ISSN 2519-402X

Белорусский государственный технологический университет
1930–2020

ТРУДЫ БГТУ

Научный журнал

Серия 1

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО, ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ РЕСУРСОВ

№ 2 (234) 2020 год

Рубрики номера:

Управление лесами, лесоустройство и информационные системы в лесном хозяйстве

Лесная экология и лесоводство

Лесовосстановление и лесовозведение

Лесозащита и садово-парковое строительство

Туризм и лесоохотничье хозяйство

Лесопромышленный комплекс. Транспортно-технологические вопросы

Деревообрабатывающая промышленность

Общеинженерные вопросы лесопромышленного комплекса

Минск 2020

Учреждение образования
«Белорусский государственный
технологический университет»

ТРУДЫ БГТУ

Научный журнал

Издается с июля 1993 года

Серия 1

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО, ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ РЕСУРСОВ

№ 2 (234) 2020 год

Выходит два раза в год

Минск 2020

Educational institution
“Belarusian State Technological University”

PROCEEDINGS OF BSTU

Scientific Journal

Published monthly since July 1993

Issue 1

FORESTRY. NATURE MANAGEMENT. PROCESSING OF RENEWABLE RESOURCES

No. 2 (234) 2020

Published biannually

Minsk 2020

Учредитель – учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

Главный редактор журнала – Войтов Игорь Витальевич, доктор технических наук, профессор, Республика Беларусь

Редакционная коллегия журнала:
Дормешкин О. Б., доктор технических наук, профессор (заместитель главного редактора), Республика Беларусь;
Жарский И. М., кандидат химических наук, профессор (заместитель главного редактора), Республика Беларусь;
Кунтыш В. Б., доктор технических наук, профессор, Республика Беларусь;
Прокопчук Н. Р., член-корреспондент НАН Беларуси, доктор химических наук, профессор, Республика Беларусь;
Водопьянов П. А., член-корреспондент НАН Беларуси, доктор философских наук, профессор, Республика Беларусь;
Новикова И. В., доктор экономических наук, профессор, Республика Беларусь;
Наркевич И. И., доктор физико-математических наук, профессор, Республика Беларусь;
Долгова Т. А., кандидат физико-математических наук, доцент, Республика Беларусь;
Торчик В. И., доктор биологических наук, Республика Беларусь;
Захарук Т., доктор педагогических наук, профессор, Республика Польша;
Пайвинен Ристо, доктор наук, профессор, Финляндская Республика;
Барчик Стэфан, доктор наук, профессор, Словацкая Республика;
Жантасов К. Т., доктор технических наук, профессор, Республика Казахстан;
Харша Ратнавира, доктор наук, профессор, Королевство Норвегия;
Рангелова Е. М., доктор педагогических наук, профессор, Республика Болгария;
Шкляр Бенцион, профессор, Государство Израиль;
Хассель Л. Г., доктор наук, профессор, Королевство Швеция;
Файгле В., доктор наук, профессор, Федеративная Республика Германия;
Флюрик Е. А., кандидат биологических наук, доцент (секретарь), Республика Беларусь.

Редакционная коллегия серии:
Кунтыш В. Б., доктор технических наук, профессор (главный редактор серии), Республика Беларусь;
Штукин С. С., доктор сельскохозяйственных наук, профессор (заместитель главного редактора серии), Республика Беларусь;
Звягинцев В. Б., кандидат биологических наук, доцент, Республика Беларусь;
Каплич В. М., доктор биологических наук, профессор, Республика Беларусь;
Крук Н. К., кандидат биологических наук, доцент, Республика Беларусь;
Носников В. В., кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Республика Беларусь;
Соловьева Т. В., доктор технических наук, профессор, Республика Беларусь;
Торчик В. И., доктор биологических наук, Республика Беларусь;
Парфенов В. И., академик НАН Беларуси, доктор биологических наук, профессор, Республика Беларусь;
Булавик И. М., доктор сельскохозяйственных наук, Республика Беларусь;
Кох Барбара, доктор наук, профессор, Федеративная Республика Германия;
Лакида П. И., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Украина;
Маркова И. А., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Российская Федерация;
Пайвинен Ристо, доктор наук, профессор, Финляндская Республика;
Саевич К. Ф., доктор биологических наук, профессор, Республика Беларусь;
Сарнацкий В. В., доктор биологических наук, Республика Беларусь;
Тябера Альбинас, доктор наук, профессор, Литовская Республика;
Усеня В. В., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Республика Беларусь;
Коробко Е. В., доктор технических наук, профессор, Республика Беларусь;
Вавилов А. В., доктор технических наук, профессор, Республика Беларусь;
Бир Петр, доктор технических наук, профессор, Республика Польша;
Барчик Стэфан, доктор наук, профессор, Словацкая Республика;
Савельев А. Г., доктор технических наук, профессор, Латвийская Республика;
Балтрушайтис Антанас, кандидат технических наук, Литовская Республика;
Онегин В. И., доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники, Российская Федерация;
Башкиров В. Н., доктор технических наук, профессор, Российская Федерация;
Богданович Н. И., доктор технических наук, профессор, Российская Федерация;
Игнатович Л. В., кандидат технических наук, доцент (ответственный секретарь), Республика Беларусь;
Гордей Д. В., кандидат биологических наук (секретарь), Республика Беларусь.

Адрес редакции: ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.
Телефоны: главного редактора журнала – (+375 17) 226-14-32;
главного редактора серии – (+375 17) 327-87-30.
E-mail: root@belstu.by, http://www.belstu.by

Свидетельство о государственной регистрации средств массовой информации
№ 1329 от 23.04.2010, выданное Министерством информации Республики Беларусь.
Журнал включен в «Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований»

© УО «Белорусский государственный технологический университет», 2020

Publisher – educational institution "Belarusian State Technological University"

Editor-in-chief – Voitau Ihar Vital'evich, DSc (Engineering), Professor, Republic of Belarus

Editorial (Journal):
Dormeshkin O. B., DSc (Engineering), Professor (deputy editor-in-chief), Republic of Belarus;
Zharskiy I. M., PhD (Chemistry), Professor (deputy editor-in-chief), Republic of Belarus;
Kuntysh V. B., DSc (Engineering), Professor, Republic of Belarus;
Prokopchuk N. R., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc (Chemistry), Professor, Republic of Belarus;
Vodop'yanov P. A., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc (Philosophy), Professor, Republic of Belarus;
Novikova I. V., DSc (Economics), Professor, Republic of Belarus;
Narkevich I. I., DSc (Physics and Mathematics), Professor, Republic of Belarus;
Dolgova T. A., PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Republic of Belarus;
Torchik V. I., DSc (Biology), Republic of Belarus;
Zakharuk T., DSc (Pedagogics), Professor, Republic of Poland;
Paivinen Risto, DSc, Professor, Republic of Finland;
Barcík Štefan, DSc, Professor, Slovak Republic;
Zhantasov K. T., DSc (Engineering), Professor, Republic of Kazakhstan;
Harsha Ratnaweera, DSc, Professor, Kingdom of Norway;
Rangelova E. M., DSc (Pedagogics), Professor, Republic of Bulgaria;
Shklyar Benzion, Professor, State of Israel;
Hassel L. G., DSc, Professor, Kingdom of Sweden;
Faigle W., DSc, Professor, Federal Republic of Germany;
Flyurik E. A., PhD (Biology), Associate Professor (secretary), Republic of Belarus.

Editorial (Issue):
Kuntysh V. B., DSc (Engineering), Professor (managing editor), Republic of Belarus;
Shtukin S. S., DSc (Agriculture), Professor (sub-editor), Republic of Belarus;
Zvyagintsev V. B., PhD (Biology), Associate Professor, Republic of Belarus;
Kaplich V. M., DSc (Biology), Professor, Republic of Belarus;
Kruk N. K., PhD (Biology), Associate Professor, Republic of Belarus;
Nosnikov V. V., PhD (Agriculture), Associate Professor, Republic of Belarus;
Solov'yeva T. V., DSc (Engineering), Professor, Republic of Belarus;
Torchik V. I., DSc (Biology), Republic of Belarus;
Parfenov V. I., Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc (Biology), Professor, Republic of Belarus;
Bulavik I. M., DSc (Agriculture), Republic of Belarus;
Koch Barbara, DSc, Professor, Federal Republic of Germany;
Lakida P. I., DSc (Agriculture), Professor, Ukraine;
Markova I. A., DSc (Agriculture), Professor, Russian Federation;
Paivinen Risto, DSc, Professor, Republic of Finland;
Saevich K. F., DSc (Biology), Professor, Republic of Belarus;
Sarnatskiy V. V., DSc (Biology), Republic of Belarus;
Tebėra Albinas, DSc, Professor, Republic of Lithuania;
Usenya V. V., DSc (Agriculture), Professor, Republic of Belarus;
Korobko E. V., DSc (Engineering), Professor, Republic of Belarus;
Vavilov A. V., DSc (Engineering), Professor, Republic of Belarus;
Beer Piotr, DSc (Engineering), Professor, Republic of Poland;
Barcík Štefan, Professor, Slovak Republic;
Savel'yev A. G., DSc (Engineering), Professor, Republic of Latvia;
Baltrushaitis Antanas, PhD (Engineering), Republic of Lithuania;
Onegin V. I., DSc (Engineering), Professor, Honored Worker of Science and Engineering, Russian Federation;
Bashkirov V. N., DSc (Engineering), Professor, Russian Federation;
Bogdanovich N. I., DSc (Engineering), Professor, Russian Federation;
Ignatovich L. V., PhD (Engineering), Associate Professor (executive editor), Republic of Belarus;
Gordey D. V., PhD (Biology) (secretary), Republic of Belarus.

Contact: 13a, Sverdlova str., 220006, Minsk.
Telephones: editor-in-chief (+375 17) 226-14-32;
managing editor (+375 17) 327-87-30.
E-mail: root@belstu.by, http://www.belstu.by

© Educational institution
"Belarusian State
Technological University", 2020

УПРАВЛЕНИЕ ЛЕСАМИ, ЛЕСОУСТРОЙСТВО И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

УДК 630*61

В. П. Зорин, П. В. Севрук
Белорусский государственный технологический университет

УСТОЙЧИВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛЕСАМИ – ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОСНОВА «ГЕНЕРАЛЬНОГО ПЛАНА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ ГОСУДАРСТВА ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ЛЕСОВ И ВЕДЕНИЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА»

С точки зрения основной эколого-экономической проблемы современности рассматриваются вопросы увеличения концентрации парниковых газов, возникает необходимость создания концепции устойчивого управления лесами и повышения эффективности использования территории государства не только с экономической точки зрения. Устойчивое управление лесами, основанное на международных критериях оценки состояния лесных экосистем, позволит разработать способы такого управления лесами, которое охватывает весь круг проблем сохранения лесов и повышения использования продуктивности земель государства. Реализация концепции устойчивого управления лесами Беларуси требует улучшения существующих и создания новых механизмов учета принятий решения по повышению эффективности землепользования и их экологических функций. Воспроизводство не отдельных элементов природной среды, а всего природного комплекса (леса, поля, вода и т. д.) является предметом анализа естественных процессов и результатов производственной деятельности, отражающей не отраслевой, а территориальный государственный признак.

Цель работы заключается в обосновании необходимости разработки стратегического плана комплексного использования природных ресурсов территории государства и контроля за их состоянием. Устойчивое управление лесами Беларуси требует планирования землепользования в государстве на долгосрочный период в целях повышения коэффициента использования плодородия почвы. По нашему мнению, одним из главных механизмов решения этой глобальной проблемы может быть «Генеральный план».

Ключевые слова: лес, устойчивое управление лесами, критерии и индикаторы, использование территории государства, план стратегический, план генеральный.

V. P. Zorin, P. V. Sevruk
Belarusian State Technological University

SUSTAINABLE FOREST MANAGEMENT – ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC BASIS OF THE "MASTER PLAN FOR USING THE STATE TERRITORY FOR FOREST GROWING AND FOREST MANAGEMENT"

From the point of view of the main environmental and economic problems of our time, issues of increasing the concentration of greenhouse gases are considered, the need arises to create a concept of sustainable forest management and improve the efficiency of use of the state's territory, not only from an economic point of view. Sustainable forest management, based on international criteria for assessing the state of forest ecosystems, will allow developing methods of forest management that covers the whole range of forest conservation problems and increasing the use of state land productivity. The implementation of the concept of sustainable forest management in Belarus requires the improvement of existing and the creation of new mechanisms for accounting decision-making to improve land use efficiency and their environmental functions. The reproduction not of individual elements of the natural environment, but of the entire natural complex (forests, fields, water, etc.) is the subject of analysis of natural processes and production results, reflecting not a sectoral, but a territorial state sign.

The purpose of the work is to justify the need to develop a strategic plan for the integrated use of natural resources of the state and control over their condition. Sustainable forest management in Belarus requires long-term land use planning in the state in order to increase the utilization rate of soil fertility. In our opinion, the "Master Plan" may be one of the main mechanisms for solving this global problem.

Key words: forest, sustainable forest management, criteria and indicators, use of state territory, strategic plan, master plan.

Введение. Качество природной среды выражается показателями, характеризующими ее состояние как взаимосвязанного комплекса всех элементов экосистемы (земля, вода, лес, атмосфера, элементы урбанизации). Именно с этой точки зрения необходимо подходить к определению общих и локальных целей в сфере анализа эффективности использования территории государства.

Очевидно, что общей целью в данном случае должна выступать целевая структура лесного фонда, как элемента стабилизации природной среды, такой же подход должен распространяться и на другие элементы природного комплекса, при этом обеспечивая выход на определенное целевое качество и продуктивность (сельскохозяйственные земли и другие территории).

Воспроизводство не отдельных элементов природной среды, а всего природного комплекса (леса, поля, воды и т. д.) составляет основу анализа естественных процессов и результатов производственной деятельности, отражающей не отраслевой, а территориальный (государственный) признак [1].

Процесс анализа использования территории государства для воспроизводства лесов преследует цель перевода лесного фонда из исходного состояния в заданное, имея в виду его качественные и количественные характеристики как элемента природной среды. Этот процесс должен осуществляется путем включения лесного фонда в эколого-экономическую систему государства.

Важнейшей отправной точкой научных основ устойчивого управления является признание законов природы приоритетными по отношению к законам экономического развития. Рассматривая это с точки зрения лесной экосистемы, легко заметить, что на первый план выходят площади лесов, их продуктивность и расчет размера лесопользования. При этом всегда исходим из того, что расчеты природного цикла первичной продуктивности являются достаточным обоснованием для планирования и осуществления вмешательства в лесные экосистемы, а природный потенциал лесных экосистем позволяет восстанавливать изъятый ресурс.

В рамках такого подхода общество, удостоверяя свои экономические потребности, должно заботится о сохранности и жизнеспособности лесных экосистем, т. е. определять размер ежегодного изъятия лесных ресурсов, планировать процесс восстановления, выращивание и сохранение лесных биогеоценозов.

Данная схема использования территории государства, покрытой лесом, не позволяет эффективно планировать лесохозяйственную и сельскохозяйственную деятельность, так как лесохозяйственная планируется на ближайшие 10 лет, а сельскохозяйственная – на 2–4 года. Таким образом, 2/3 территории государства не могут быть связаны с планированием их использования в общем севообороте. Под «севооборотом» в данном случае понимается возможность использования территории лесного фонда в целях сельского хозяйства после вырубки спелого леса и наоборот – передача низкобальных по плодородию и других земель, не используемых в сельском хозяйстве, для выращивания лесов. Одним из современных перспективных методов получения информации по Республике Беларусь являются методы дистанционного зондирования лесов [2].

Реализация концепции устойчивого управления лесами Беларуси требует улучшения существующих и создания новых типов механизмов учета и принятия решений планирования землепользования в целях обеспечения долгосрочного устойчивого и эффективного использования земельных ресурсов государства и повышения их экологических функций. Для этого необходимо обосновать переход к новому порядку лесохозяйственных работ, который соответствовал бы всем природным циклам лесных экосистем. Как минимальное требование необходимо рассмотреть переход к планированию лесопользования и лесовосстановления на оборот рубки, т. е. на срок, равный естественной спелости плюс один класс возраста на лесовосстановительный период [3].

Основная часть. Опыт показал, что проблему устойчивого управления лесами с целью сокращения лесных экосистем и повышения их экологической продуктивности невозможно решить только путем ограничений и ужесточений пользования природой.

Необходимы новые инструменты политики использования территории государства для реализации обязательств не только отдельного государства в области устойчивого управления лесами, землями и т. д. Должны быть разработаны способы такого управления природными экосистемами, которые отражали бы весь круг проблем не только сохранения лесов, но и повышения вклада лесов в достижение общественных, т. е. экологических благ, а именно

увеличение абсорбции парниковых газов, смягчение погодноклиматических воздействий на окружающую природную среду в процессе поглощения лесами атмосферного диоксида углерода и его частичной секвестрации в виде углерода фитомассы, органического углерода почвы и других компонентов лесного фонда.

Реализация концепции устойчивого управления лесами Беларуси требует улучшения существующих и создания новых типов механизмов принятия решений и планирования землепользования в государстве на долгосрочный период в целях повышения коэффициента использования плодородия почвы.

По нашему мнению, одним из главных механизмов, позволяющих обеспечить повышение роли лесных биогеоценозов в глобальном масштабе, является «Генеральный плана использования территории государства для выращивания лесов и ведения лесного хозяйства».

Основой этого документа должна быть почвенно-типологическая карта государства, отражающая качество (богатство) почвы по плодородию и оценке использования государственной территории. Это позволит рационально распределить территорию государства между основными землепользователями (сельскохозяйственное использование и лесопользование), а также определить и планировать использование территории, занятой водой (озера, реки, болота) и предназначенной для обеспечения транспортных потоков и населенных пунктов.

Особенностью Генерального плана в области эколого-экономической составляющей лесного хозяйства является планирование ведения лесного хозяйства на период оборота рубки (60–90 лет) [4].

В настоящее время национальная инвентаризация лесов Беларуси представлена классической системой проведения лесоустроительных работ с повторяемостью 10 лет, основанной на наименее затратном методе таксации насаждений – глазомерном способе. Она позволяет получать исходные данные о характеристике качества земель лесного фонда невысокой точности в размерах одного-двух кварталов по растениям-индикаторам. Этот способ не позволяет масштабно оценивать потенциальные возможности плодородия лесных почв, что отрицательно сказывается на продуктивности лесных насаждений к возрасту рубки (спелости).

Наибольшее значение для растительности в составе атмосферного воздуха имеет кислород, углекислый газ, в свою очередь, является одним из основных компонентов в синтезе органического вещества. Кроме данных химических элементов, в атмосферном воздухе присутствуют также примеси поллютантов, основную массу которых составляет пыль (растворимые и нерастворимые компоненты), дым, которые оказывают отрицательное влияние на жизнедеятельность растений и их «здоровье».

Пришло время, когда устойчивое управление лесами необходимо оценивать не только по соблюдению действующих требований Международных критериев и показателей устойчивого управления лесами и основанной на них сертификации, но и по состоянию устойчивости экосистемы (биогеоценоза), способной сопротивляться воздействию антропогенной нагрузки («здоровье лесов»).

Анализ результатов международной программы «Человек и биосфера» показал, что хотя суша составляет 29,7% от общей площади земного шара, именно ей принадлежит 64% ежегодно создаваемой фитомассы, в том числе 60% – в лесах.

Из общего запаса органического вещества земного шара около 90% сконцентрировано в лесах. Наземные экосистемы ежегодно за счет фотосинтеза поглощают из атмосферы около 100 млрд т углерода и выделяют в результате дыхания около 50 млрд т кислорода. Хозяйственная деятельность человека может влиять на массу фотосинтезирующей поверхности земли путем увеличения территорий лесов, снижая темпы их деградации и повышая продуктивность.

Каждое государство имеет право контролировать и анализировать эффективность использования своей территории.

На основании приведенных данных международной программы «Человек и биосфера» процесс анализа коэффициента эколого-экономической эффективности использования своей территории приобретает особую значимость [5].

Этот фактор жизнедеятельности лесных биогеоценозов детально отражен в издании БГТУ «Экологоориентированное развитие лесного хозяйства Беларуси в условиях климатических изменений», в частности, в разделах «Национальный план действий по адаптации лесного хозяйства к изменению климата до 2030 года», «Национальный план действий по увеличению абсорбции (леса, болота) на период до 2030 года».

В плане по адаптации должно быть предусмотрено разделение реализации намеченных мероприятий по этапам и агроклиматическим зонам.

План действий по увеличению абсорбции парниковых газов позволяет оценивать вклад территории государства, покрытых лесами, в реализации обязательств по Парижскому соглашению. Леса Беларуси являются стабильной основой воздействия на углеродные потоки в глобальном круговороте. Увеличение фитомассы лесной экосистемы Беларуси обеспечило существенное возрастание поглощения углерода от атмосферы в леса и его депонирование в древесном запасе и почве земель лесного фонда.

Имеющиеся на данный момент исследования позволяют сделать вывод, что интенсивность

депонирования увеличивается пропорционально повышению продуктивности древостоев, что неразрывно связано с почвенно-климатическими условиями [6].

Планирование использования территории государства, покрытой лесом, неизбежно связано с почвенно-типологическими характеристиками. Данные обстоятельства потребуют перехода на почвенно-типологический метод проведения лесоустройства. Эта работа весьма трудоемка, она требует больших финансовых затрат и времени.

Однако устойчивая углерододепонирующая динамика лесов Беларуси позволит государству иметь положительную экологическую ренту, которая частично возместит предыдущие затраты.

В данном варианте должны быть представлены, во-первых, целевые и промежуточные параметры особенностей природной среды государства, в составе которых должны быть установлены взаимосогласованные параметры состояния каждого природного ресурса (леса, сельскохозяйственные земли, вода, атмосфера и т. д.), во-вторых, финансовое обеспечение целей, связанных с достижением намеченных параметров качества природной среды [7].

Заключение. Предполагаемый вариант организации отношений по использованию территории государства позволит сформировать более эффективный эколого-экономический и правовой механизм регулирования этих отношений. Главным его блоком является механизм формирования целей в сфере лесохозяйственной и сельскохозяйственной деятельности, который устанавливает цели лесного хозяйства на оборот рубки. Тем самым он обеспечивает условие построения механизма ответственности как за сохранение, воспроизводство и использование лесного фонда на перспективу (до 60–90 лет), осуществляя при этом перераспределение территории между всеми субъектами, располагающими правами на использование вверенной им территории государства, так и за реализацию экологически и экономически обоснованного управления лесами.

Государственная собственность на леса предусматривает контроль за ведением национальной инвентаризации всех территорий экологических систем (лесов, земель, воды и т. д.) и эффективностью их использования не только в текущий период, но и на историческую перспективу.

Создание такой информационной системы необходимо для оптимизации затрат на ведение лесного хозяйства, сельскохозяйственное землепользование, эксплуатацию и использование водных систем и ресурсов.

Новая доктрина совершенствования и использования территории государства нужна в первую очередь для сохранения и выживания лесов на период преобладания в мире рыночной модели экономического развития. Дальнейшая «судьба» метода оценки эффективности использования территории государства, а следовательно, и экологической составляющей зависит от включения новой системы оценки природных комплексов в национальные системы экономических расчетов по экономическому развитию.

Поэтому нужна долгосрочная политика по оценке эффективности использования природных комплексов (леса, земли, вода, транспортная сеть, территории городов и населенных пунктов).

Каждый критерий Генерального плана использования территории государства должен содержать стратегические целевые показатели, основанные на глубоком анализе прогнозов будущего состояния всех экологических систем.

Как один из вариантов можно рассматривать проект создания полезащитных полос на территории Брестской и Гомельской областей на низкобальных землях сельхозпользования, на которых в весенний период образуются пыльные бури. Это мероприятие не только позволит сохранить почвенное плодородие, но и станет источником повышения лесистости территории Республики Беларусь [8, с. 35, 36].

Таким образом, устойчивое управление природными комплексами с целью сохранения биоразнообразия, повышения их качества использования на территории государства напрямую зависит от продуктивности и рационального планирования использования качества почв, их водного баланса и климатических особенностей [8, с. 30–33].

Сейчас назрела настоятельная необходимость не только разработки программ по сохранению биоразнообразия, но и информирования населения о значении биоразнообразия.

Биологические ресурсы территории государства и контроль за их состоянием жизненно необходимы для экономического и социального развития, повышения уровня жизни населения и качества окружающей среды.

Леса есть экологический фактор (индикатор) окружающей среды, который оказывает влияние на существование человека и его жизнедеятельность. Человек, как и любой другой биологический вид, зависит от условий окружающей среды и подчиняется ее требованиям.

Список литературы

1. Государственная программа «Белорусский лес» на 2016–2020 годы [Электронный ресурс]: утв. постановлением Совета Министров Республики Беларусь, 18.03.2016, № 215 // Сайт Национальной академии наук Беларуси. URL: (http://nasb.gov.by/rus/activities/research/2016/les_2016-2020.pdf) (дата обращения: 16.03.2019).

2. Толкач И. В. Измерительное дешифрирование и оценка таксационных показателей сосновых древостоев по цифровым снимкам сверхвысокого разрешения // Труды БГТУ. 2014. № 1: Лесное хоз-во. С. 48–51.

3. Зорин В. П. Воспроизводство ресурсов и критерии устойчивого управления и развития лесов // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2008. Вып. XVI. С. 16–20.

4. Зорин В. П. Стратегические цели и критерии устойчивого управления лесами Беларуси // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2007. Вып. XV. С. 12–16.

5. Зорин В. П. Политика и стратегия устойчивого управления лесами Беларуси // Труды БГТУ. 2015. № 1: Лесное хоз-во. С. 16–19.

6. Равино А. В., Деревяго И. П. Лесные ресурсы Беларуси в системе устойчивого природопользования // Леса Беларуси и их рациональное использование: материалы Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 29–30 нояб. 2000 г. / БГТУ. Минск, 2000. С. 53–55.

7. Стратегический план развития лесохозяйственной отрасли на период 2015–2030 годы: утв. заместителем Премьер-министра Респ. Беларусь, 23.12.2014, № 06/201-271. Минск: Совет Министров Респ. Беларусь, 2015. 15 с.

8. Экологоориентированное развитие лесного хозяйства Беларуси в условиях климатических изменений / под общ. ред. И. В. Войтова, В. Г. Шатравко. Минск: БГТУ, 2019. 200 с.

References

1. *Gosudarstvennaya programma "Beloruskiy les" na 2016–2020 gody* [State program "Belarus Forest" for 2016–2020]. Minsk, 2016. 28 p. Available at: http://nasb.gov.by/rus/activities/research/2016/les_2016-2020.pdf (accessed 16.03.2019).

2. Tolkach I. V. Measurement interpretation and assessment of mensuration characteristics of pine forest stands on digital images of ultrahigh resolution. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 1: Forestry, pp. 48–51 (In Russian).

3. Zorin V. P. Reproduction of resources and criteria for sustainable management and development of forest. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forestry, 2008, issue 16, pp. 16–20 (In Russian).

4. Zorin V. P. Strategic goals and criteria for sustainable forest management in Belarus. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forestry, 2007, issue 15, pp. 12–16 (In Russian).

5. Zorin V. P. Policy and strategy for sustainable forest management in Belarus. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 1: Forestry, pp. 16–19 (In Russian).

6. Ravino A. V. Derevyago I. P. Forest resources of Belarus in the system of sustainable nature management. *Materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* "*Lesa Belarusi i ikh ratsinal'noye ispol'zovaniye*" [Materials of the International scientific and technical conference "Forest of Belarus and their rational use"]. Minsk, 2000, pp. 53–55 (In Russian).

7. *Strategicheskiy plan razvitiya lesokhozyaystvennoy otrasli na period 2015–2030 gody* [Strategic plan for the development of the forestry sector for the period 2015–2030]. Minsk, Sovet Ministrov Resp. Belarus' Publ., 2015. 15 p.

8. *Ekologooriyentirovannoye razvitiye lesnogo khozyaystva Belarusi v usloviyakh klimaticheskikh izmeneniy* [Environmental-oriented development of forestry in Belarus in the context of climate change]. Minsk, BSTU Publ., 2019. 200 p.

Информация об авторах

Зорин Валентин Павлович – кандидат сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: zorin@belstu.by

Севрук Павел Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, ассистент кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: sevrukpv@belstu.by

Information about the authors

Zorin Valentin Pavlovich – PhD (Agriculture), Professor, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zorin@belstu.by

Sevruk Pavel Vladimirovich – PhD (Agriculture), Assistant Lecturer, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sevrukpv@belstu.by

Поступила 26.03.2020

УДК 630*587.5

В. В. Коцан[1], И. В. Толкач[1], М. А. Ильючик[2], С. В. Ковалевский[1]
[1]Белорусский государственный технологический университет
[2]РУП «Белгослес»

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ЛЕСНОГО АНАЛИТИКО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕРЕОДЕШИФРИРОВАНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ЛЕСОУСТРОЙСТВА

Проведение аналитико-измерительного дешифрирования в стереорежиме для целей лесоустройства в первую очередь позволит повысить точность определения границ выделов. Это происходит за счет лучшей просматриваемости полога древостоя и четкого различия в высоте между насаждениями разного возраста, которые на ортофотоплане косвенно определяются по размерам крон деревьев.

Проведение измерительного дешифрирования и использование моделей зависимости между таксационными и дешифровочными показателями позволит рассчитать основные таксационные показатели (состав древостоя, средний диаметр, средняя высота, полнота и запас древостоя), и, что немаловажно, эти показатели определяются на основании анализа полога всего выдела, что порой затруднительно в полевых условиях. Такой подход позволит уменьшить количество ошибок, возникающих при таксации выделов с неравномерным распределением пород по площади выдела, а также уменьшить количество пунктов таксации, а в некоторых случаях позволит не заходить в отдельные выделы.

Целью данных исследований является проработка указанных вопросов на практике и применительно к производственным вопросам лесоустройства на территории лесных массивов Республики Беларусь, выявление сложности внедрения данной технологии в производство и определение ее слабых мест для дальнейшей доработки.

Ключевые слова: лесоустройство, стереодешифрирование, аналитико-измерительное дешифрирование, таксационные показатели, модели взаимосвязи.

V. V. Kotsan[1], I. V. Tolkach[1], M. A. Il'yuchik[2], S. V. Kovalevskiy[1]
[1]Belarusian State Technological University
[2]RUE "Belgosles"

PRACTICAL ASPECTS OF APPLICATION OF THE FOREST ANALYTICAL-MEASURING STEREO-DECODING METHOD FOR TASKS OF FOREST MANAGEMENT

Conducting of analytical-measuring decoding in stereo mode for forest management purposes will primarily improve the accuracy of determination the boundaries of plots. This is due to better visibility of the canopy of the stand and a clear difference in height between plantations of different ages, which are indirectly determined on the orthophotomap by the size of the crowns of trees.

Conducting of measuring decoding and using models of the relationship between taxation and decoding indicators will allow to calculate the main taxation indicators (composition of the stand, average diameter, average height, completeness and stand stock) and, importantly, these indicators are determined on the basis of the analysis of the canopy of the entire stand, which is sometimes difficult in field conditions. This approach will reduce the number of errors that occur during taxation of plots with an uneven distribution of rocks over the area of the plot, as well as reduce the number of taxation points, and in some cases will allow not going into separate plots.

The purpose of these investigations is the study of these issues in practice and in relation to production issues of forest management on the territory of the forests of the Republic of Belarus. And also identify the difficulties of introducing this technology into production and determinate its weaknesses for further development.

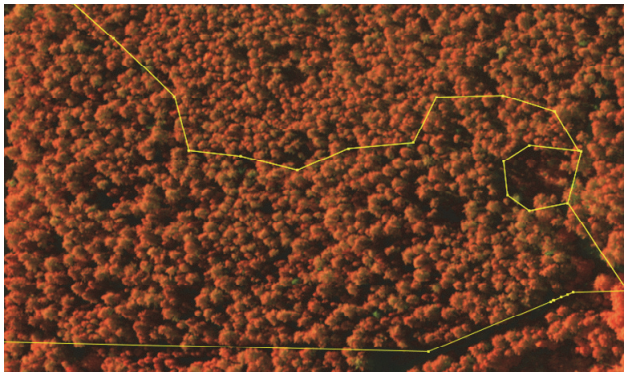
Key words: forest management, stereo-decoding, analytical-measuring decoding, taxation indicators, relationship models.

Введение. На территории ГЛХУ «Воложинский лесхоз» было проведено аналитико-измерительное стереодешифрирование на 59 выделах в 3 кварталах. По результатам камеральной обработки контрольных объектов в полевых условиях глазомерным методом (при необходимости проводились инструментальные измерения) была проведена проверка полученных результатов.

На основании анализа дешифровочной и натурной таксации были разработаны модели зависимости между таксационными и дешифровочными показателями, при этом статистические показатели данных уравнений указывают на необходимость их доработки после сбора большего количества полевого материала [1].

Основная часть. Сбор полевых данных на контрольных объектах проводился глазомерным методом таксации в соответствии с ТКП 622-2018 (33090) «Технические требования при лесоустройстве. Отвод и таксация лесосек в лесах Республики Беларусь» [2]. Глазомерный (визуальный) метод таксации применяется в молодняках, средневозрастных, приспевающих насаждениях, а также в спелых и перестойных насаждениях, не включенных в размер главного пользования. Глазомерно (визуально) определенные показатели лесного насаждения при необходимости уточняются инструментальными замерами. Минимальное количество пунктов таксации для каждого выдела определяется в соответствии с ТКП 622-2018 (33090). Описания в пунктах таксации производились независимо от наличия или отсутствия различий таксационных показателей насаждения. Таксационная характеристика в целом для таксационного выдела определялась как среднее значение показателей пунктов таксации.

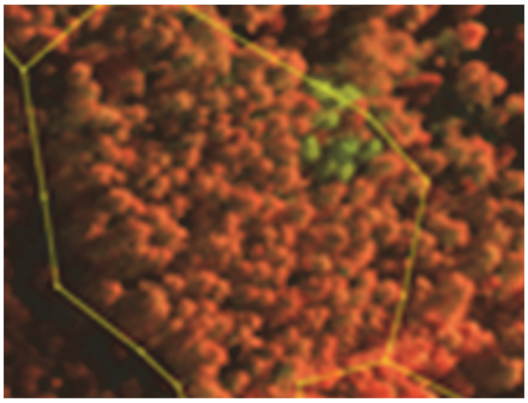
В ходе полевой проверки данных дешифрирования выявились некоторые недочеты дешифровочного метода с использованием снимков сканера Leica ADS100 [3]. При определении таксационной характеристики выдела невозможно точно определить санитарное состояние выдела, на актуальных снимках хорошо различимы сухостойные деревья, особенно куртины сухостоя, вызванные, например, поражением корневой губки. В данной ситуации возможно назначение санитарных рубок в зависимости от степени повреждения древостоя. Но определить наличие упавших деревьев и объем захламленности в выделе по снимкам, а следовательно, и назначить соответствующие хозяйственные мероприятия является невозможным. На рис. 1 показано изображение выдела с захламленностью на снимке и в натуре.



Вид на снимке

Вид в натуре

Рис. 1. Выдел с захламленностью



Вид на снимке

Вид в натуре

Рис. 2. Выдел с подростом ели

Также в ходе камерального дешифрирования снимков невозможно определить наличие в выделе подроста, его породный состав, таксационную и качественную характеристики. Иногда однородный на снимке выдел имеет в натуре часть с подростом и часть, в которой он отсутствует, и поэтому должен быть разделен на 2 выдела, так как в данных древостоях необходимо проведение различных мероприятий по дальнейшему лесовостановлению. На рис. 2 показан выдел в натуре с наличием подроста и его изображение на снимке.

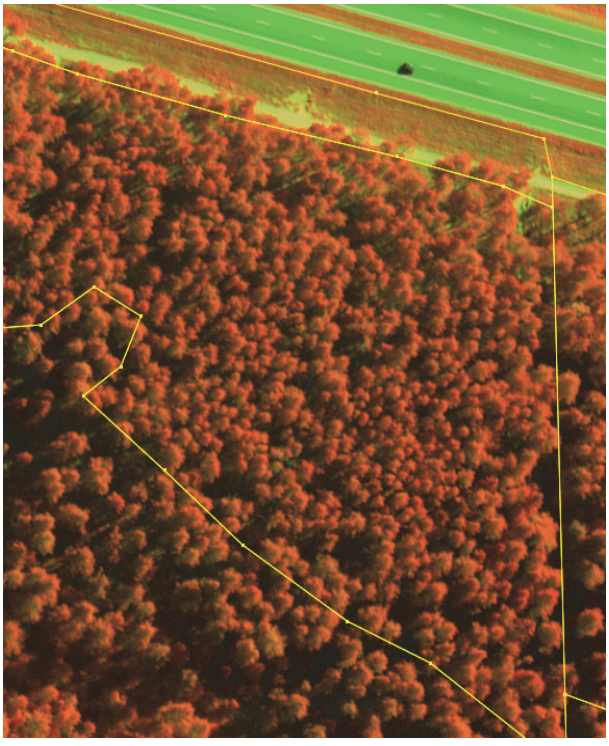
Также в ходе полевой проверки было замечено, что древостои, имеющие 2-й ярус (на контрольных объектах состав 2-го яруса был 10Е), имеют сложности при определении таксационной характеристики. На рис. 3 представлен вид на снимке и вид в натуре соснового древостоя с 2-м ярусом ели. Дешифровочным методом сложно определить таксационную характеристику 2-го яруса и выяснить, достаточно ли полноты еловой части древостоя для его выделения.

Также существуют нюансы при таксации дешифровочным методом таких категорий земель, как дороги и квартальные просеки. По снимкам практически невозможно определить их состояние и назначить хозяйственные мероприятия, если такие требуются. При нанесении на снимке дорог затруднительно, а порой невозможно определить их местоположение. На рис. 4 изображена дорога, часть которой просматривается на снимке, но дальнейшее ее положение необходимо определять в натуре.

Исследуемый объект находится в лесном фонде ГЛХУ «Воложинский лесхоз» в пойме реки Ислочь, что сказывается на его рельефе. Он имеет склон в сторону русла реки, а местами яры и ложбины, в некоторых частях исследуемого объекта перепад высот на участке в 30 м доходит до 9 м (рис. 5). Этот факт приводит к тому, что возникают существенные ошибки при определении средней высоты древостоя и в некоторых случаях при определении границ выдела или выделении новых выделов в стереорежиме. При дешифрировании снимка часть древостоя, находящаяся в понижении, имеет меньшую высоту и выделяется в отдельный выдел.

Таким образом, после проведения камерального дешифрирования отдельные моменты в таксационной характеристике выдела необходимо уточнять таксаторам в натуре.

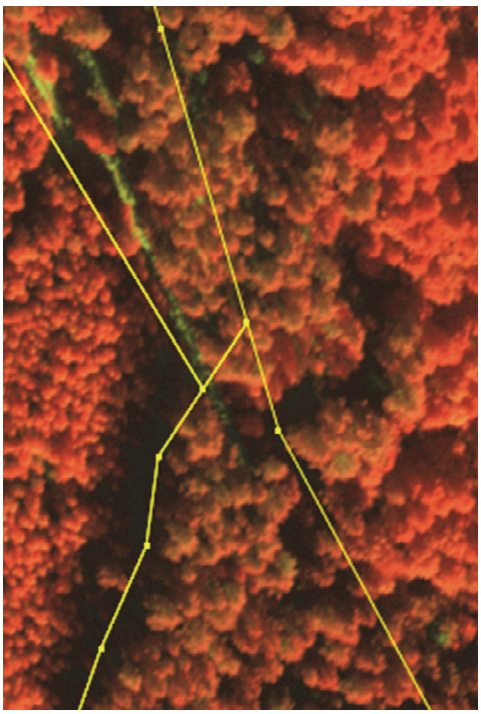
На основании материалов, собранных при натурной таксации контрольных объектов, и выявленных неточностей моделирования таксационных показателей с помощью пакета программ Statistica 10.0 был проведен корреляционный анализ зависимостей между таксационными и дешифровочными показателями.



Вид на снимке

Вид в натуре

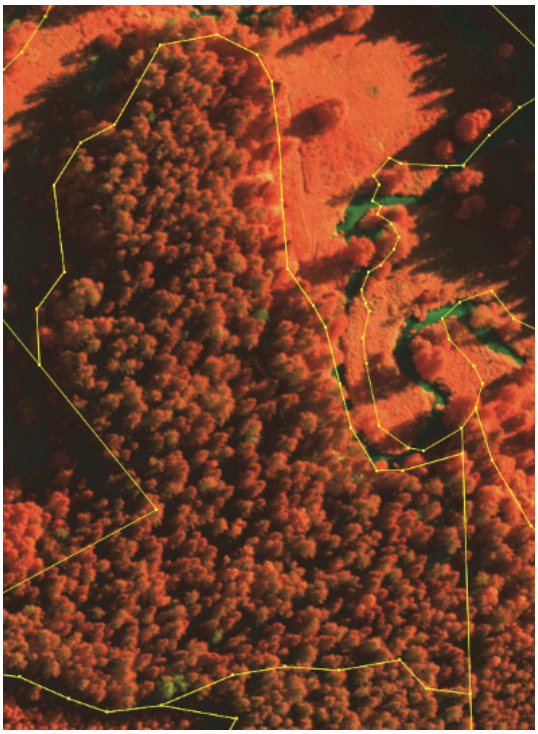
Рис. 3. Выдел с 2-м ярусом ели



Вид на снимке

Вид в натуре

Рис. 4. Категория земель «дороги»



Вид на снимке

Вид в натуре

Рис. 5. Выдел с большим перепадом высот

Измеренный средний диаметр древостоя имеет наибольшую связь с высотой ствола – на это указывает коэффициент корреляции, равный 0,47. Этот показатель имеет значение ниже нормы, что говорит о неоднородности анализируемой совокупности. При дальнейшем анализе было выявлено, что средняя измеренная высота древостоя имеет взаимосвязь средней силы со средним дешифрированным диаметром кроны (0,62) и дешифрированной высотой древостоя (0,70). Полнота имеет досто-

верную связь с дешифровочным диаметром кроны, коэффициент корреляции которой равен 0,51.

При анализе модели, определяющей диаметр ствола на основании диаметра кроны и высоты дерева, в некоторых выделах было замечено значительное отклонение этого показателя от полевых данных. При детальном анализе этих выделов выявлено, что они состоят из деревьев двух поколений, диаметр крон которых существенно различается. Этот факт приводит к тому, что при измерительном дешифрировании диаметра кроны, если не определить разновозрастность древостоя, будет получен усредненный диаметр кроны для обоих поколений. Недостоверно измеренный дешифровочный показатель приводит к тому, что диаметр основной части древостоя занижается или завышается (в зависимости от того, какое поколение принимается основным пологом). Даже если нет оснований для выделения 2-го яруса, для таких насаждений необходимо разрабатывать другие модели, так как здесь существенную роль играет соотношение деревьев различных возрастов.

Подобные проблемы возникают при определении зависимости между дешифровочной сомкнутостью полога и полнотой древостоя. Разработанная нами модель для определения полноты древостоя на основании дешифровочной сомкнутости и высоты в разновозрастных древостоях дает большие отклонения от натурных данных. Это объясняется различным характером зависимости между сомкнутостью и полнотой древостоя в различном возрасте. А в разновозрастных насаждениях при этом необходимо также учитывать соотношение количества стволов данных возрастов.

Зависимость дешифрированной высоты древостоя от измеренной высоты древостоя имеет коэффициент корреляции 0,7, это свидетельствует о том, что существуют ошибки в определении высоты дешифровочным методом, в некоторых случаях они доходят до 2 м.

С увеличением полноты происходит и увеличение сомкнутости полога древостоя. При этом в некоторых выделах, полнота которых равна 0,7, сомкнутость полога равна 0,66, что ниже, чем в среднем по выборке. Объясняется это тем, что возраст данных древостоев около 100 лет, что влечет за собой другое соотношение диаметров кроны и диаметров ствола и, как следствие, полноты древостоя. А так как основная выборка представлена средневозрастными и приспевающими древостоями, то эти выделы выпадают из общей совокупности.

С увеличением диаметра кроны сомкнутость полога увеличивается, при этом присутствуют древостои, где той же сомкнутости соответствуют древостои с меньшими диаметрами крон. При сомкнутости полога, равной 0,7, диаметры крон равны 3,6 и 3,8 м^2. Это может быть следствием разноворастности древостоев и связанных с этим проблем, описанных выше. Для того чтобы сделать обоснованные выводы и найти закономерности, необходимо больше полевого материала.

Заключение. В ходе полевых работ были выявлены положительные и отрицательные моменты использования предлагаемой технологии. Определены объекты лесного фонда, таксация которых дешифровочным методом является затруднительной и требует полевой проверки полученных результатов. Из положительных моментов выявлено, что использование предлагаемой технологии позволит более точно определять границы выделов и уменьшит количество ошибок, которые получаются за счет неоднородной структуры выдела.

Технология рационального сочетания наземной таксации с аналитико-измерительным стереодешифрированием для задач лесоустройства с использованием цифровой фотограмметрической системы PHOTOMOD, разработанная на основании проделанных дешифровочных работ на территории ГЛХУ «Воложинский лесхоз», а также предыдущие разработки кафедры лесоустройства [4, 5] могут быть внедрены в производственный процесс РУП «Белгослес», что позволит усовершенствовать существующую систему, повысить ее точность и уменьшить трудозатраты.

Список литературы

1. Коцан В. В., Толкач И. В. Организационно-техническая схема применения метода лесного аналитико-измерительного стереодешифрирования для задач лесоустройства // Лесное хозяйство: материалы докл. 83-й науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. сотр. и асп. (с междунар. участием), г. Минск, 4–14 фев. 2019 г. Минск: БГТУ, 2019. С. 18.

2. Технические требования при лесоустройстве. Отвод и таксация лесосек в лесах Республики Беларусь: ТКП 622-2018 (33090). Введ. 12.07.2018. Минск: М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 2018. 96 с.

3. Толкач И. В., Саевич Ф. К. Спектральные и яркостные характеристики основных лесообразующих пород на снимках сканера Leica ADS100 // Труды БГТУ. 2016. № 1: Лесное хоз-во. С. 24–27.

4. Пушкин А. А., Сидельник Н. Я., Ковалевский С. В. Использование материалов космической съемки для оценки пожарной опасности в лесах // Труды БГТУ. 2015. № 1: Лесное хоз-во. С. 36–40.

5. Ожич О. С., Толкач И. В. Автоматизированная система измерительного дешифрирования чистых сосновых древостоев на цифровых аэро- и космических снимках // Лесное хозяйство: тез. докл. 81-й науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. сотр. и асп. (с междунар. участием), г. Минск, 1–12 фев. 2017 г. Минск: БГТУ, 2017. С. 16.

References

1. Kotsan V. V., Tolkach I. V. Organizational and technical scheme for applying the parameters of forest analytics-measuring stereo-decryption for forest inventory problems. *Tezisy dokladov 83-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Lesnoye khozyaystvo"* [Theses of the 81st scientific and technical conference "Forestry"]. Minsk, 2019, p. 18 (In Russian).

2. TKP 622-2018 (33090). Technical requirements in forest management. The allocation and inventory of cutting areas in conducting forest management activities in the forests of the Republic of Belarus. Minsk, Ministry of forestry of the Republic of Belarus Publ., 2018. 96 p. (In Russian).

3. Tolkach I. V., Saevich F. K. Spectral and brightness characteristics of the main forest-forming species in the images of the Leica ADS100 scanner. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 1: Forestry, pp. 24–27 (In Russian).

4. Pushkin A. A., Sidel'nik N. Ya., Kovalevskiy S. V. The using of the satellite imagery for the assessment of the forest fire danger. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 1: Forestry, pp. 36–40 (In Russian).

5. Ozhich O. S., Tolkach I. V. Automated system for measuring the interpretation of pure pine stands on digital airborne and satellite images. *Tezisy dokladov 81-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Lesnoye khozyaystvo"* [Theses of the 81st scientific and technical conference "Forestry"]. Minsk, 2017, p. 16 (In Russian).

Информация об авторах

Коцан Владимир Васильевич − кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: wolodia250@belstu.by

Толкач Игорь Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: i.tolkach@belstu.by

Ильючик Михаил Александрович – кандидат сельскохозяйственных наук, начальник отдела приема и обработки космической информации. РУП «Белгослес» (220014, г. Минск, ул. Железнодорожная, 27, Республика Беларусь). E-mail: info@belgosles.by

Ковалевский Сергей Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kovalevsky@belstu.by

Information about the authors

Kotsan Vladimir Vasil'yevich − PhD (Agriculture), Assistant Lecturer, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: wolodia250@belstu.by

Tolkach Igor' Vladimirovich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Head of the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: i.tolkach@belstu.by

Il'yuchik Mikhail Aleksandrovich – PhD (Agriculture), Head of the Department of Receiving and Processing Space Information. RUE "Belgosles" (27, Zheleznodorozhnaya str., 220014, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: info@belgosles.by

Kovalevskiy Sergey Vladimirovich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kovalevsky@belstu.by

Поступила 31.03.2020

УДК 630*232

О. А. Севко, В. В. Коцан
Белорусский государственный технологический университет

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ НА ТАКСАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ В СЛОЖНОМ ДРЕВОСТОЕ

В данной работе представлены результаты исследования, проведенного в сложных смешанных сосново-еловых с примесью березы древостоях в возрасте 70–80 лет. Влияние пространственной структуры оценивалось параллельно с межвидовыми отношениями в древостое. Для каждого дерева определялись местоположение в системе условных координат, по два перпендикулярных диаметра, высота дерева, высота начала кроны, 4 радиуса кроны. С помощью компонентов Q-ГИС была сформирована цифровая карта пробной площади.

На основании пространственного распределения деревьев для каждой породы (сосны, ели, березы) определялись центральные деревья, различные по интенсивности прироста. Далее для каждого из центральных деревьев трех исследуемых пород были определены деревья-соседи и взяты керны, на основании анализа данных которых впоследствии определялся средний годичный радиальный прирост. С помощью регрессионного анализа оценено влияние соседних деревьев на центральные деревья и определены наиболее значимые воздействующие параметры.

Ключевые слова: текущий прирост, пространственная структура, сосново-березовый древостой, регрессионный анализ.

O. A. Sevko, V. V. Kotsan
Belarusian State Technological University

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SPATIAL STRUCTURE ON TAXATION INDICATORS IN COMPLEX TREE

This paper presents the results of a study conducted in complex mixed pine-spruce mixed with birch stands at the age of 70–80 years. The influence of the spatial structure was evaluated in parallel with interspecific relationships in the stand. For each tree, the location in the system of conditional coordinates was determined, two perpendicular diameters, the height of the tree, the height of the beginning of the crown, 4 radius of the crown. Using Q-GIS components, a digital trial plot map was generated.

Based on the spatial distribution of trees for each species, pine, spruce, birch, central trees were determined, different in growth rate. Further, for each of the central trees of the three studied species, neighbor trees and core samples were determined, but based on an analysis of the data which subsequently determined the average annual radial growth. Using regression analysis, the influence of neighboring trees on central trees was estimated and the most significant impacting parameters were determined.

Key words: current growth, spatial structure, current growth, spatial structure, pine-spruce forest stand, regression analysis.

Введение. Большое количество исследований в области лесоведения говорят о высокой роли конкуренции за ресурсы, связанной с размещением деревьев на площади. Таксационный выдел очень мозаичен. Процессы воздействия растений друг на друга следует рассматривать как совокупность явлений. Учет конкуренции между деревьями должен использоваться для повышения точности оценки годичного прироста и насаждения в целом.

Элементарным объектом в таксации леса считается растущее дерево. Оценка уровня конкуренции, которой подвергается растущее дерево, позволяет получать больше информации о таксационных особенностях роста древостоев, определить ряд технологических особенностей в области рубок ухода.

Необходимо учитывать факт, что рост растения зависит от минерального питания, климата, поступления влаги и т. д. Также для изучения роста деревьев необходимо оценивать уровень взаимоотношений между древостоем и отдельными деревьями, которые характеризуют состояние растительных сообществ [1].

Особенно большую роль во взаимоотношениях деревьев играют затенение и корневая конкуренция за питательные вещества в почве, именно это часто определяет исход конкурентной борьбы.

Исследования динамики таксационных показателей смешанных древостоев приведены в различных литературных источниках как белорусских, так и зарубежных авторов [2, 3, 4, 5].

В лесу в результате жестокой конкуренции часть деревьев погибает. При рассмотрении

роста одновозрастных древостоев можно выявить значительную конкуренцию в молодняках: густота очень велика, деревца стоят густо, отпад наибольший. С течением времени в средневозрастных и приспевающих древостоях процесс отмирания несколько замедляется. Когда деревья становятся спелыми, рост их в высоту и разрастание крон в ширину практически прекращаются. Они уже мало конкурируют друг с другом, каждое дерево занимает свое определенное место в лесу и не подавляет своих соседей. Взаимное влияние деревьев остается, но оно довольно слабое. Численность деревьев на единице площади стабилизируется. Итак, процесс естественного отмирания деревьев с возрастом леса имеет одну очень характерную особенность: вначале отмирание идет очень быстрыми темпами, а затем все более и более замедляется.

Поэтому при моделировании роста и продуктивности деревьев в насаждениях и динамики органического вещества в лесных экосистемах должны учитываться конкурентные отношения – через показатели конкуренции. Учет конкурентных отношений между деревьями необходим для повышения точности оценки фитомассы и годичного прироста как деревьев, так и насаждения в целом.

При исследовании биопродуктивности деревьев в насаждениях большую роль играет учет влияния конкурентных отношений, связанных с характером размещения деревьев на площади. По мнению С. Н. Сеннова [6], из всех факторов, влияющих на процесс взаимодействия растений между собой, вклад конкуренции, или количественное выражение конкурентных отношений, легче всего определить с использованием индекса конкуренции (CI), поскольку в методическом отношении это довольно просто. Аналогичные подходы наблюдаются в работах В. В. Коцана [7, 8, 9] и О. А. Севко [10].

Методы учета конкурентных отношений посредством различных показателей конкуренции и их влияние на продукционные характеристики подразделяются на оценку без учета характеристик центрального дерева, но с выявлением оптимального радиуса влияния, или с учетом названных характеристик центрального дерева, но без выявления оптимального радиуса влияния.

В работах В. А. Усольцева и М. М. Семышева описана попытка совместить различные подходы и выявить влияние нескольких показателей конкуренции на фитомассу и прирост ствола дерева с учетом его таксационных характеристик и с установлением оптимального радиуса влияния в чистых естественных и искусственных сосняках [11].

Вопрос оптимального расстояния остается актуальным при производстве лесных культур, проведении рубок ухода и лесоустроительном проектировании. Величина данного показателя зависит от большого количества факторов. Поэтому однозначно дать ему численную характеристику по каждой породе невозможно. Его можно выразить моделью зависимости от группы факторов. Современные методы и технологии позволяют решить поставленные задачи. С их помощью можно проводить сравнительный анализ разновременных картографических материалов одних и тех же пробных площадей или стационаров с одинаковыми условиями, но разными моделями рубки. Это позволит сделать правильные выводы и быстрее найти нужную закономерность для успешного развития леса.

Основная часть. Все масштабные и точные исследование лесного биогеоценоза всегда связаны с закладкой постоянных пробных площадей (стационаров). Информация, собранная на них, всегда самая точная, потому что является результатом измерения множества показателей как отдельного дерева (диаметр, высота, высота штамба, диаметр кроны и др.), так и всего древостоя (полнота, сомкнутость, расстояние между деревьями и др.).

В данной работе представлены результаты исследования, проведенного в сложных смешанных сосново-елово-березовых древостоях в возрасте 70–80 лет. Влияние пространственной структуры оценивалось параллельно с межвидовыми отношениями в древостое.

Для выполнения данной работы была заложена пробная площадь в 11-м выделе 48-го квартала Центрального лесничества Негорельского учебно-опытного лесхоза.

При работе на стационаре сбор полевого материала был разделен на два этапа: первый – картирование местонахождения деревьев, второй – измерение параметров деревьев.

Диаметр стволов измерялся мерной вилкой, высота деревьев – оптическим высотомером SUUNTO PM5/1520. Радиус крон, так же как и положения деревьев в системе координат, определялся с помощью ультразвукового дальномера Haglof DME.

Для каждого дерева на пробной площади определялись местоположение в системе условных координат методом линейных засечек в квадратах 10×10 м (рис. 1), по два перпендикулярных диаметра, высота дерева, высота начала кроны, четыре радиуса кроны.

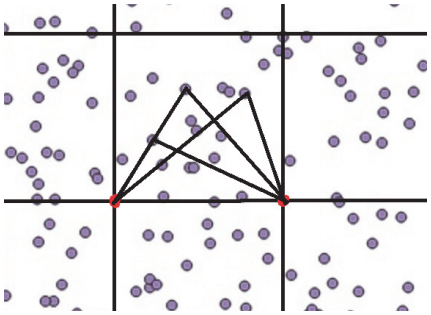


Рис. 1. Определение координат деревьев

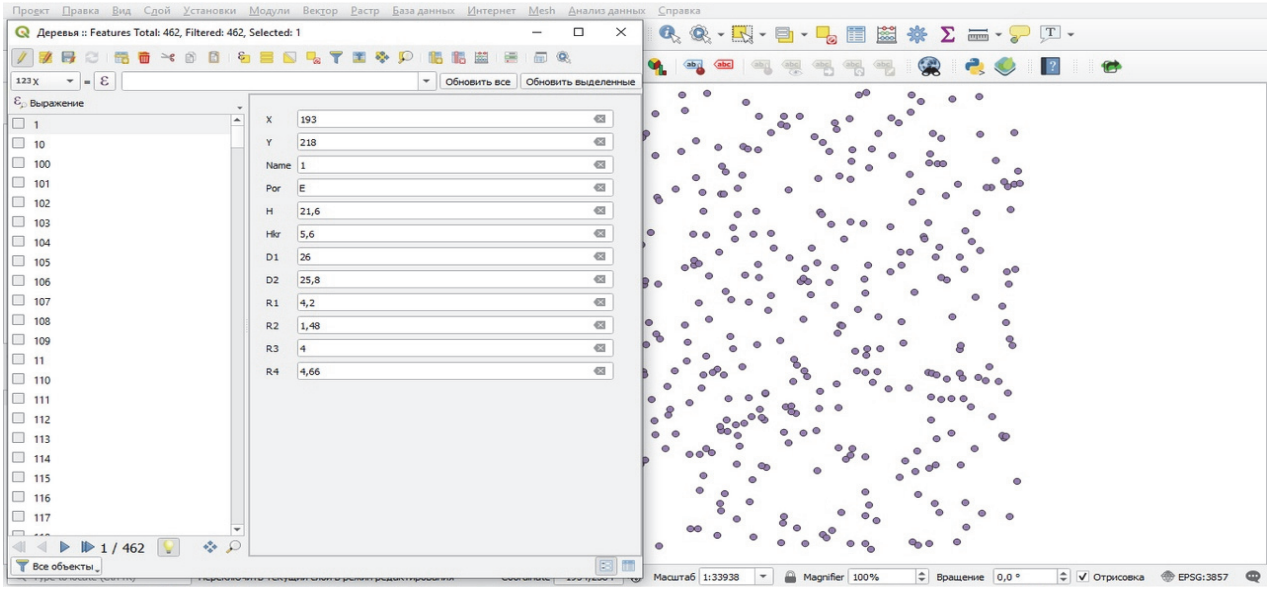


Рис. 2. Векторный слой и атрибутивные данные

Собранные данные вносились в геоинформационную систему «Quantum GIS». В ходе обработки экспериментальных данных и картирования по собранным в процессе полевых работ координатам была определена пространственная структура древостоя [12]. С помощью компонентов Q-ГИС была сформирована цифровая карта пробной площади (рис. 2).

Для дальнейшего анализа методом стратифицированной выборки было подобрано по 25 деревьев всех присутствующих пород, что составило от 10% (по ели) до 25% (по березе) от количества стволов по породам на пробной площади. Данные деревья были приняты центральными в своих биогруппах. Для этих стволов брались керны, на основании анализа данных которых в последствии определялся средний годичный радиальный прирост.

Измерение ширины годичных колец проводилось после подготовки поверхности для получения четкого изображения. Перед обрезкой продольной стороны образец смачивался 3%-ным раствором глицерина, что значительно облегчало обрезку и повышало контраст между поздним и ранним приростом. Обрезка керна проводилась острым ножом перпендикулярно направлению древесных волокон. Радиальный прирост измерялся посредством измерения ширины годичных колец строго перпендикулярно их границам (рис. 3).

Далее для каждого из центральных деревьев трех исследуемых пород были определены деревья-соседи, влияющие на их таксационные показатели (рис. 4).

Рис. 3. Фотография керна при измерении годичного радиального прироста

Первоначально уравнения строились на зависимости прироста от одного какого-либо таксационного показателя соседнего дерева. Нельзя сказать, что какой-то из показателей влияет на прирост центральных деревьев в большей степени. Смешанный древостой является сложным биогеоценозом, поэтому необходимо подобрать такие уравнения, которые наилучшим образом описали бы влияние деревьев различных пород на прирост центральных деревьев.

Исследование показало необходимость использования большего количество переменных. Однако не представляется возможным получить графическое отображение более сложных уравнений.

Влияние ели на ель оказалось незначительно (R = 0,3–0,4) (табл. 1), круги конкуренции самой ели редко пересекаются между собой, при этом ель находится под гораздо большим влиянием вышестоящих сосны и березы. Регрессионный анализ уравнений связи таксационных показателей березы (диаметра, высоты, радиуса кроны) и расстояния до центральных деревьев ели с таксационными показателями ели выявил также незначительную корреляцию – 0,41–0,46. Корреляция таксационных показателей и расстояния до центральных деревьев ели с радиальным приростом ели достигает 0,71, на высоту влияние гораздо ниже – R = 0,36.

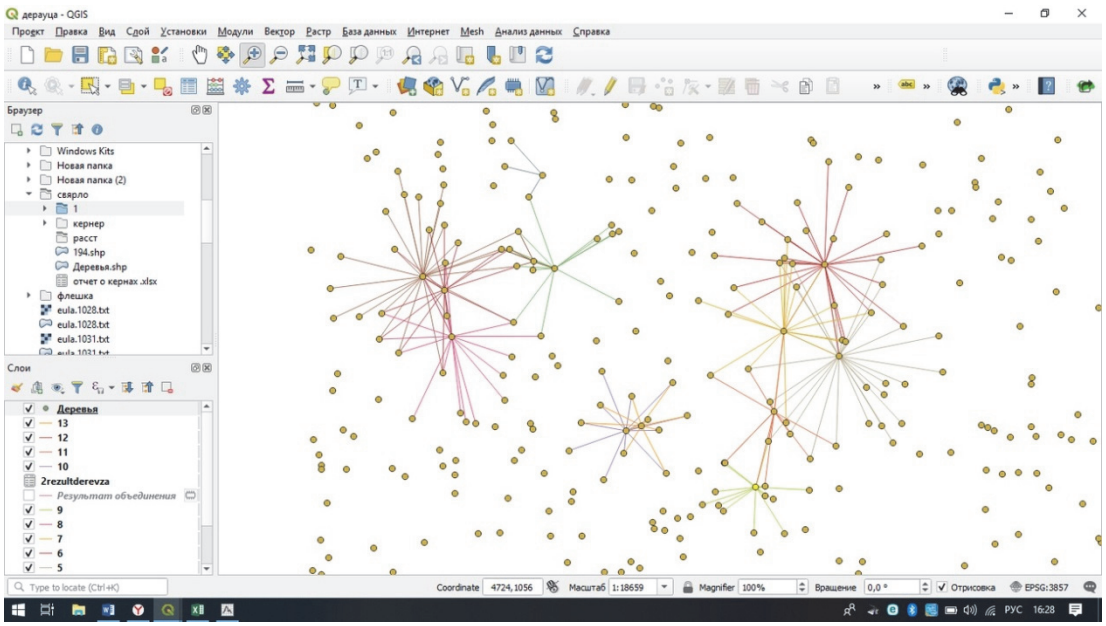


Рис. 4. Картографическая информация по Лименскому лесничеству по расположению промежуточных складов с необходимой продукцией

Таблица 1

Уравнения зависимости таксационных показателей ели от параметров соседних деревьев

Показатель	Уравнения	Коэффициент корреляции R
Влияние ели		
Z_r	$b_0+b_1/(L+R)+b_2/H^2+b_3/D^3$	0,29384376
D	$b_0+b_1/(L\cdot R)+b_2\cdot H^2+b_3\cdot D^3$	0,31957192
H	$b_0+b_1/(L\cdot R)+b_2\cdot H^2+b_3\cdot D^3$	0,28020153
R	$b_0+b_1/(L\cdot R)+b_2\cdot H^2+b_3\cdot D^3$	0,32789168
Влияние сосны		
Z_r	$b_0+b_1/L+b_2\cdot H^2+b_3\cdot D^2$	0,72471296
D	$b_0+b_1/L^3+b_2\cdot H^2+b_3/D^3+b_4/R$	0,37936493
H	$b_0+b_1/L^3+b_2\cdot H^3+b_3/D^3+b_4/R$	0,36669121
R	$b_0+b_1/L^3+b_2\cdot H^2+b_3/D^3+b_4/R^3$	0,36793422
Влияние березы		
Z_r	$b_0+b_1/L+b_2\cdot H^3+b_3\cdot D^2$	0,4147779
D	$b_0+b_1/L+b_2\cdot H^3+b_3\cdot D^2$	0,46692255
H	$b_0+b_1/L+b_2\cdot H^3+b_3\cdot D^2$	0,46704217
R	$b_0+b_1/(L\cdot R)+b_2/H^2+b_3/D^3$	0,60027399
Влияние пней		
Z_r	$b_0+b_1\cdot L+b_2\cdot L^3$	0,31328328
D	$b_0+b_1/L+b_2\cdot L^3$	0,35596784
H	$b_0+b_1/L+b_2\cdot L^3$	0,31216424

Влияние соседних пород на таксационные показатели березы выявлено не было. Вероятно, в данном случае это связано с незначительной долей березы, большим расстоянием до этих деревьев, доминированием крон березы при сравнении с другими породами. Их влияние на соседние деревья выше. Следовательно, оценивать влияние на березу надо в более раннем возрасте.

На центральные деревья сосны влияние березы значительно, зависимость диаметров сосны от таксационных показателей березы и пространственной структуры можно описать регрессионным уравнением с корреляцией до 0,79. Влияние на деревья сосны может описываться регрессионными уравнениями связи с корреляцией около 0,6 (табл. 2).

Таблица 2

Уравнения зависимости таксационных показателей сосны от параметров соседних деревьев

Показатель	Уравнения	Коэффициент корреляции R
Береза		
D	$b_0+b_1\cdot L^2+b_2\cdot D+b_3\cdot H+b_4\cdot R^2$	0,79313954
H	$b_0+b_1/L^3+b_2\cdot D+b_3\cdot H+b_4\cdot R$	0,70018238
R	$b_0+b_1\cdot L+b_2/D^3+b_3\cdot H+b_4/R^3$	0,63386477
Сосна		
D	$b_0+b_1\cdot L^2+b_2/H+b_3\cdot D+b_4\cdot R^2$	0,70253009
H	$b_0+b_1\cdot H+b_2\cdot D+b_3\cdot R^3+b_4/L^3$	0,78374370
R	$b_0+b_1\cdot L^3+b_2\cdot H^3+b_3\cdot D+b_4/R^3$	0,70647059
Ель		
D	$b_0+b_1\cdot L+b_2/H^2+b_3/D^2+b_4\cdot R$	0,64547146
H	$b_0+b_1\cdot L^3+b_2\cdot D^3+b_3\cdot H^3+b_4\cdot R^3$	0,29501680
R	$b_0+b_1\cdot L^3+b_2\cdot H^3+b_3\cdot D+b_4\cdot R$	0,47691161
Пень		
D	$b_0+b_1\cdot L^3$	0,42996012
H	$b_0+b_1\cdot L^3$	0,10355181
R	$b_0+b_1\cdot L^3$	0,06516926

Проделанная работа позволяет выявить основные направления для дальнейшего изучения и правильно организовать постановку эксперимента в дальнейшем по изучению вопроса влияния пространственной структуры на развитие смешанных и сложных древостоев.

Исследование влияния пространственной структуры на таксационные показатели древостоев и возможности формирования оптимальной пространственной структуры рубками ухода позволяет привести к максимизации прироста древостоев и получению максимальной прибыли от лесовыращивания.

Заключение. Основываясь на результатах данной работы, можно утверждать, что влияние пространственной структуры нужно учитывать для мероприятий по возобновлению древостоев: создания оптимальных схем смешения лесных культур, а следовательно, и оптимальных по густоте культур, что очень важно для дальнейшего роста и развития насаждения и его продуктивности, а также формирования лучших по составу смешанных насаждений, что в свою очередь снизит отрицательное влияние конкурентных отношений между деревьями различных пород.

Также полученные данные можно использовать для планирования мероприятий по уходу. Формирование пространственной структуры может улучшить эффект проведения рубок ухода, так как даст возможность более правильно выбирать деревья для рубки, также это будет способствовать улучшению качества и количества получаемых сортиментов и формированию максимально продуктивных насаждений в более короткие сроки, а это является одним из главных аспектов в лесовыращивании и лесоводстве.

Следовательно, результаты данного исследования, как и материалы других исследователей, могут являться основой для дальнейшей разработки нового подхода к целевому лесовыращиванию и регламентированию рубок ухода.

Список литературы

1. Вайс А. А. Горизонтальная структура нормальных сосновых насаждений левобережной и правобережной пригородной зоны г. Красноярска // Хвойные бореальной зоны. 2006. Вып. 3. С. 29–31.

2. Взаимоотношения древесных пород в чистых и смешанных насаждениях // Эколого-физиологические основы взаимодействия растений в фитоценозах / И. Н. Рахтеенко [и др.]. Минск: Наука и техника, 1976. С. 23–28.

3. Грибанов В. Я. Пространственная структура сосновых и лиственных деревьев // Продуктивность лесных фитоценозов: сб. ст. / отв. ред. И. Н. Елагин. Красноярск: ИЛИД, 1984. С. 42–47.

4. Мирошников В. С. Сосново-березовые насаждения БССР, их строение, лесоводственное и хозяйственное значение: автореф. дис. … канд. с.-х. наук / БЛТИ. Минск, 1955. 14 с.

5. Романов В. С. Изучение сосново-березовых культур в лесах БССР: автореф. дис. … канд. с.-х. наук. / Академия наук БССР; Ин-т социалистического сельского хозяйства. Минск, 1956. 18 с.

6. Сеннов С. Н. Итоги экспериментального изучения конкуренции в древостоях // Изв. С.-Петербургской лесотехнической академии. 1993. № 11. С. 160–172.

7. Коцан В. В. Взаимосвязи между таксационными показателями деревьев в кругах конкуренции на примере сосняков мшистых искусственного происхождения // Труды БГТУ. 2014. № 1: Лесное хоз-во. С. 19–22.

8. Коцан В. В. Классификация деревьев на основании пространственной структуры при назначении в рубки ухода // Труды БГТУ. 2015. № 1: Лесное хоз-во. С. 24–27.

9. Коцан В. В. Оценка влияния пространственной структуры на таксационные показатели древостоев с использованием цифровой модели пространственного распределения // Лесное хозяйство: тез. докл. 76-й науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. сотр. и асп., г. Минск, 13–20 фев. 2012 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: О. А. Атрощенко (гл. ред.) [и др.]. Минск, 2012. С. 13.

10. Севко О. А. Оценка зависимости текущего прироста сосновой части смешанных сосново-березовых древостоев от их пространственной структуры // Труды БГТУ. 2015. № 1: Лесное хоз-во. С. 41–45.

11. Усольцев В. А., Семышев М. М. Продукционные характеристики с учетом конкуренции деревьев в искусственных и естественных сосняках: сравнительный анализ. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 137 с.

12. Севко О. А., Коцан В. В. Методика создания цифровой модели пространственного распределения деревьев по материалам постоянных пробных площадей с использованием ГИС-технологий // Труды БГТУ. 2011. № 1: Лесное хоз-во. С. 53–57.

References

1. Vays A. A. The horizontal structure of normal pine plantations of the left-bank and right-bank suburban areas of the city of Krasnoyarsk. *Khvoynye boreal'noy zony* [Coniferous boreal zones], 2006, issue 3, pp. 29–31 (In Russian).

2. Rakhteenko I. N., Martinovich B. S., Kabashkikova G. I. [et al.] The relationship of tree species in clean and mixed stands. *Ekologo-fiziologicheskie osniovy vzaimodeystviya rasteniy v fitotsenozakh* [Ekological and physiological basis for the interaction of plants in phytocenoses]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1976. 216 p. (In Russian).

3. Gribanov V. Ya. The spatial structure of pine and deciduous trees. *Produktivnost' lesnykh fitotsenozov* [Productivity of forest phytocenoses]. Krasnoyarsk, ILID Publ., 1984, pp. 42–47 (In Russian).

4. Miroshnikov V. S. *Sosnovo-berezovye nasazhdeniya BSSR, ikh stroenie, lesovodstvennoe i khozyaystvennoe znachenie: avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* [Pine-birch plantations of the BSSR, their structure, forestry and economic importance: abstract of thesis PhD (Agriculture)]. Minsk, 1955. 14 p.

5. Romanov V. S. *Izuchenie sosnovo-berezovykh kul'tur v lesakh BSSR: avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* [The study of pine-birch crops in the forests of the BSSR: abstract of thesis PhD (Agriculture)]. Minsk, 1956. 18 p.

6. Sennov S. N. Results of an experimental study of competition in stands. *Izv. S.-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [News of St. Petersburg Forestry Engineering Academy], 1993, no. 11, pp. 160–172 (In Russian).

7. Kotsan V. V. The relationship between taxation indicators of trees in the circles of competition on the example of mossy pine forests of artificial origin. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 1: Forestry, pp. 19–22 (In Russian).

8. Kotsan V. V. Classification of trees based on spatial structure when assigned to thinning. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 1: Forestry, pp. 24–27 (In Russian).

9. Kotsan V. V. Assessment of the influence of spatial structure on taxation indicators of stands using a digital model of spatial distribution. *Lesnoe khozyaystvo: tez. dokl. 76-y nauch.-tekhn. konf. prof.-prepod. sostava, nauch. sotr. i asp.* [Forestry: abstracts of the 76th scientific and technical conference of professors, researchers and graduate students], Minsk, 2012. P. 13 (In Russian).

10. Sevko O. A. Assessment of the dependence of the current growth of the pine part of mixed pine-birch stands on their spatial structure. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 1: Forestry, pp. 41–45 (In Russian).

11. Usol'tsev V. A., Semyshev M. M. *Produktsionnye kharakteristiki s uchetom konkurentsii derev'ev v iskusstvennykh i estestvennykh sosnyakakh: sravnitel'nyy analiz* [Productive characteristics taking into account the competition of trees in artificial and natural pine forests: a comparative analysis]. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2007. 137 p.

12. Sevko O. A., Kotsan V. V. Technique for creating a digital model of the spatial distribution of trees based on materials of constant test plots using GIS technologies. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2011, no. 1: Forestry, pp. 53–57 (In Russian).

Информация об авторах

Севко Оксана Александровна − кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: o.sevko@belstu.by

Коцан Владимир Васильевич – кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: wolodia250@belstu.by

Information about the authors

Sevko Oksana Aleksandrovna − PhD (Agriculture), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: o.sevko@belstu.by

Kotsan Vladimir Vasil'yevich − PhD (Agriculture), Senior Lecturer, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: wolodia250@belstu.by

Поступила 31.03.2020

УДК 630*587.5

И. В. Толкач[1], Л. А. Мицевич[2], О. В. Кравченко[1]
[1]Белорусский государственный технологический университет
[2]Государственное предприятие «Белгеодезия»

ФОРМИРОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ВЫСОТ ДРЕВОСТОЕВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОЙ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ PHOTOMOD

В статье рассматривается методика автоматизированного создания цифровой модели высот древостоев в цифровой фотограмметрической системе PHOTOMOD с использованием модулей PHOTOMOD DSM и PHOTOMOD dDSM. Исходными данными послужили материалы съемки воздушного сканера ADS-100 (LEICA). Описаны основные этапы создания цифровой модели высот, включающие создание проекта, предварительную обработку и радиометрическую коррекцию снимков, формирование цифровой модели поверхности крон деревьев (ЦМП), цифровой модели рельефа (ЦМР), вычисление на их основе цифровой модели высот древостоев. Для формирования ЦМР целесообразно чередование полуавтоматической фильтрации ЦМП с применением фильтра строений и растительности с разными параметрами интерактивного редактирования оператором в стереоскопическом режиме. Сравнительная оценка средних высот древостоев, вычисленных с использованием цифровой модели и измеренных в результате выборочной таксации насаждений, показала, что разработанная методика и получаемые по ней цифровые модели высот древостоев могут быть рекомендованы для использования при автоматизированной оценке средних высот древостоев в технологии инвентаризации лесов путем камерального аналитико-измерительного дешифрирования материалов аэросъемок при устройстве лесов с высоким радиоактивным загрязнением и других не вовлекаемых в хозяйственное использование объектов.

Ключевые слова: цифровая фотограмметрическая система PHOTOMOD, цифровая модель поверхности, цифровая модель рельефа, цифровая модель высот древостоев, дешифрирование, аэрофотоснимок.

I. V. Tolkach[1], L. A. Mitsevich[2], O. V. Kravchenko[1]
[1]Belarusian State Technological University
[2]State Enterprise “Belgeodesy”

FORMATION OF THE DIGITAL ALTITUDE MODEL TREES WITH USE DIGITAL PHOTOGRAMMETRIC SYSTEM PHOTOMOD

The article discusses the technique of automated creation of a digital model of the heights of stands in the digital photogrammetric system PHOTOMOD using the modules PHOTOMOD DSM and PHOTOMOD dDSM. The source data was the shooting material of an air scanner ADS-100 (LEICA). The main stages of creating a digital model of heights are described, including the creation of a project, preliminary processing and radiometric correction of images, the formation of a digital model of the surface of tree crowns (DTM), a digital elevation model (DEM), and calculation of a digital model of the heights of stands on their basis. To form a DEM, it is advisable to alternate the semiautomatic filtering of the DSC using a filter of buildings and vegetation with various parameters of interactive editing by the operator in stereoscopic mode. A comparative assessment of the average heights of the stands calculated using a digital model and measured as a result of selective taxation of the stands showed that the developed methodology and the digital models of the heights of the stands obtained from it can be recommended for use in the automated assessment of the average heights of stands in the forest inventory technology using desk analytic we do not involve measuring decoding of aerial survey materials when installing scaffolding with high radioactive contamination and others s in the economic use of facilities.

Key words: digital photogrammetric system, digital surface model, digital elevation model, radiometric correction, decryption, aerial view.

Введение. Для устойчивого управления лесному хозяйству республики требуется информация о количественных и качественных показателях, характеризующих отдельные насаждения и лесные массивы в целом [1], получение которой полевыми методами требует значительных временных и финансовых затрат. Произошедшие на современном этапе технологические прорывы в области производства крупноформатных цифровых камер, переход на цифровые средства сбора и хранения информации, значительное улучшение качественных

характеристик космических и аэрофотоснимков, широкое внедрение технологий лазерного сканирования привели к коренному изменению подходов к получению и актуализации информации дистанционными методами. Для ее обработки стали интенсивно развиваться цифровые фотограмметрические станции и пакеты прикладных программ (ENVI, ERDAS IMAGING, GRASS, SAGA и др.), позволяющие в автоматизированном режиме выполнять измерения и интерпретацию изображений, формировать векторные карты различной тематической направленности.

В процессе аналитико-измерительного дешифрирования часть невидимых на снимках таксационных показателей древостоя вычисляется с использованием регрессионных уравнений связи с другими показателями, наибольшее значение среди которых имеет средняя высота. В России разработана и внедрена в ООО «Леспроект» новая технология инвентаризации на основе измерительного дешифрирования насаждений на цифровых аэроснимках с использованием ЦФС PHOTOMOD, где определение высоты выполняется у единичных деревьев стандартными средствами ЦФС PHOTOMOD [2, 3].

Недостаток вышеописанного метода определения высот заключается в отсутствии возможности их автоматического измерения и дальнейшей интерпретации. В этом плане значительные преимущества имеют материалы лазерной локации лесов, позволяющие создавать цифровые модели рельефа (ЦМР) и поверхности полога древостоя [4], также имеются исследования по использованию данных радиолокационной съемки [5]. Аналогичные данные можно получить и с использованием ЦФС. Однако не все фотограмметрические станции имеют средства автоматизированного построения цифровой модели поверхности. Сложность использования ЦФС заключается и в том, что при высокой полноте древостоя не всегда видна поверхность земли, что может привести к значительным ошибкам в формировании цифровой модели рельефа и определении высот.

Целью данного исследования стала разработка методики и формирование цифровой модели высот древостоев с использованием цифровой фотограмметрической станции (ЦФС) PHOTOMOD и специализированных программных модулей для построения цифровых моделей поверхности (ЦМП) и рельефа (ЦМР) в автоматизированном режиме.

Основная часть. Цифровая фотограмметрическая система PHOTOMOD [6] позволяет осуществлять полный комплекс задач от сбора данных для построения сетей фототриангуляции до создания цифровых моделей рельефа или метрических трехмерных моделей. Она работает по снимкам различных съемочных систем, таких как кадровые цифровые и пленочные камеры, космические сканирующие системы, а также радары с синтезированной апертурой. Система имеет модульную структуру, что позволяет формировать оптимальную комплектацию для решения тех или иных задач.

Особый интерес для создания цифровой модели высот древостоев имеют модуль PHOTOMOD DTM, предназначенный для создания и работы с ЦМР в различных видах (набор пикетов, TIN, матрица высот, горизонтали, редактирование в моно/стереорежиме, просмотр и анализ в 3D-окне) и имеющий широкий набор вспомогательных функций для обработки ЦМР, а также модуль PHOTOMOD dDSM, позволяющий строить в автоматическом режиме плотные модели поверхности и создавать матрицу высот методом SGM (Semi-GlobalMatching), размер ячейки которой соответствует одному пикселу изображения [6].

Для построения цифровой модели высот древостоев использованы материалы съемки воздушного сканера ADS-100 (LEICA). Уровень обработки данных, требуемый для выполнения работ в ЦФС PHOTOMOD L1, представляет собой набор метаданных и ориентированных стереопар изображений, созданных посредством синтеза четырех мультиспектральных каналов (BGRN – Blue, Green, Red, Nearinfrared). Создание синтезированных изображений выполнялось организацией-исполнителем аэрофотосъемки ГП «БелПСХАГИ» с использованием программных средств LEICA XPRO.

При определении технических параметров съемки и получаемых данных – высот древостоев – необходимо учитывать систему координат, точность геодезической привязки, радиометрическое разрешение, необходимую точность фотограмметрических измерений (в стереоскопическом режиме составляет 0,5 пиксела, что при принятом пространственном разрешении съемки составляет 0,15 м). Точность геодезической привязки данных ADS-100 для проведения топографо-геодезических работ на территории Республики Беларусь по материалам АФС принята 0,3 м, что обеспечивает корректность геодезической основы и преемственность данных.

Радиометрическое разрешение снимков сканера ADS-100 составляет 16 бит, что увеличивает объем исходных данных и время их обработки, поэтому для проведения работ по стереодешифрированию радиометрическое разрешение было снижено до 8 бит.

При конвертации векторных данных в обменные форматы возможны искажения вследствие трансформирования данных. Так, масштабный коэффициент в проекции UTM является

причиной уменьшения реальных площадей и длин объектов в непосредственной близости к осевому меридиану (21, 27, 33-й градусы для зон 34N, 35N, 36N соответственно (около 0,4 м на 1 км линии)). В программе PHOTOMOD реализована возможность измерения площадей и длин объектов как в системе координат объекта, так и на поверхности относимости.

Работа выполнялась в несколько этапов. На первом этапе осуществлялась загрузка данных сканера ADS-100 и создание проекта ЦФС PHOTOMOD с коррекцией абсолютных путей местоположения снимков и импортом результатов уравнивания. При этом устанавливались параметры системы координат, максимальная и минимальная высоты территории. Точность создания проекта проверялась импортом каталога контрольных точек, предоставленных организацией-исполнителем АФС.

В результате был создан накидной монтаж, состоящий из горизонтально расположенных сканерных снимков шириной до 6 км, с перекрытием не менее 20%, достаточным для автоматизированного дешифрирования и векторизации объектов. Для дешифрирования лесотаксационных показателей древостоя, выявления поврежденных деревьев целесообразно выполнять радиометрическую коррекцию и создание композитных изображений, включающих ближний инфракрасный канал.

В зависимости от выявляемого признака можно использовать различные комбинации каналов и их отображений. Данные комбинации подбираются с учетом требований к выполнению конкретного вида работ. При необходимости созданные комбинации возможно сохранить в файл и использовать повторно посредством импорта файла в любой проект.

Однако результаты радиометрической коррекции значительно влияют на построение ЦМП, если их применить на этапе загрузки снимков в проект. При увеличенной контрастности изображения корреляция между пикселами разных снимков для опознавания местоположения связующих точек производится более продуктивно. Если же настройки двух снимков в одной стереопаре различаются, корреляция не будет успешной. В связи с этим формирование ЦМП и ЦМР рекомендуется проводить с одинаковыми параметрами радиометрической коррекции для снимков одного проекта (стереопары) или до проведения коррекции.

На втором этапе выполнялось формирование цифровой модели поверхности (первой отражающей поверхности: вершин крон деревьев, крыш зданий и т. п.). Цифровая модель поверхности создавалась путем построения плотной матрицы (сетки) с ячейкой заданного размера. Для ускорения процесса построения требуется ввести среднюю высоту поверхности полога в области формирования ЦМП.

Процесс формирования ЦМП полностью автоматический и не требует вмешательства оператора. Затраты времени на построение ЦМП зависят от быстродействия процессора и комплектации аппаратных средств. Например, при ОЗУ 64 ГБ процесс построения на стереопаре рабочей площадью 30 км^2 составляет 1–2 ч. В случае сложного пересеченного рельефа размер сетки ЦМП рекомендуется уменьшить и разделить интересуемый регион на участки меньшего размера.

Процесс построения цифровой модели рельефа требует несколько больших затрат времени, так как зависит от сомкнутости полога древостоя на выбранном участке. Он включает полуавтоматическую фильтрацию ЦМП с использованием фильтра строений и растительности, а также редактирование оператором в стереоскопическом режиме оставшихся после фильтрации артефактов. Для достижения наилучших результатов фильтрацию целесообразно проводить несколько раз с использованием разных параметров, чередуя с ручным редактированием в стереорежиме. Точности автоматической фильтрации достаточно для формирования ЦМР под пологом большинства древостоев и лесных массивов на территории Республики Беларусь. Общее время для создания проекта PHOTOMOD, построения ЦМП и ЦМР для участка 30 км^2 составило около 40 ч (ОЗУ 64 ГБ).

Цифровая модель высот древостоев (ЦМВ) вычислялась как разность между значениями ранее полученных цифровых моделей поверхности и рельефа.

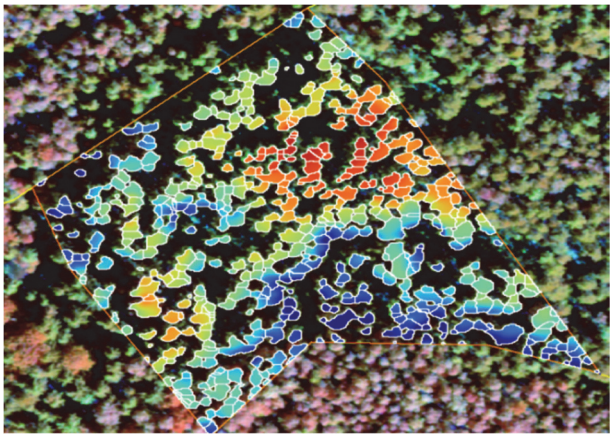
В качестве исходных данных для апробации методики и формирования цифровой модели высот древостоев послужили материалы съемки (2018 г.) сканером ADS-100 участка лесного фонда Налибокского лесничества Столбцовского лесхоза (кварталы 17–19, 26–28, 36–41), где работниками РУП «Белгослес» выполнена глазомерная и выборочная таксация насаждений. Участок подбирался по материалам таксации прошлого лесоустройства таким образом, чтобы были представлены насаждения преобладающих в Беларуси основных лесообразующих пород.

В камеральных условиях с использованием разработанной автоматизированной системы лесотаксационного дешифрирования выполнено аналитико-измерительное дешифрирование и оценка средних высот древостоев. Автоматизированная система лесотаксационного дешифрирования представляет собой комплекс аппаратных средств и программного обеспечения, основным компонентом которых является рабочая станция (персональный компьютер)

с установленным на ней программным обеспечением SAGA GIS и разработанными модулями.

В качестве исходных данных кроме снимков использовались векторный слой выделов и база данных глазомерно-измерительной таксации прошлого лесоустройства (2009 г.), векторный слой выделов текущего лесоустройства, созданный на основе контурного дешифрирования выделов и представленный работниками РУП «Белгослес».

Для оценки средних высот древостоев использована цифровая модель высот, полученная фотограмметрическим методом с применением ЦФС PHOTOMOD. Так как цифровая модель высот построена для всей территории опытного объекта, а соответственно, и анализируемых выделов, в том числе для участков между кронами деревьев, вычисленные для выделов на первом этапе средние значения высот имели значительную систематическую ошибку. Для ее устранения был изменен алгоритм обработки и перед вычислением добавлены операции по отграничению границ крон деревьев и операция обрезки цифровой модели высот полученным векторным слоем, отграничивающим вершины видимых крон деревьев (рисунок).



Обрезанный слой цифровой модели высот древостоев

В результате при вычислении использовались лишь значения цифровой модели высот, отграниченные вершинами крон деревьев, а значения, приходящиеся на промежутки между кронами, были исключены. Вычисленные средние значения высот сравнивались со значениями, полученными в полевых условиях в результате выборочной таксации древостоев.

Результаты анализа случайных и систематических ошибок оценки средних высот древостоев приведены в таблице.

Средние ошибки оценки средней высоты древостоя

Преобладающая порода	Средняя ошибка оценки средней высоты, %	
	Δ_H	S_y
Сосна	–2,69	9,45
Ель	–9,30	14,37
Береза	–3,15	9,21
Ольха черная	–1,38	8,81
Средняя на участке	–3,96	10,83

Случайная ошибка на контрольном участке составляет по высоте ±10,83%, систематическая – 3,96%. Систематические и случайные (с вероятностью 0,68) ошибки в сосновых, березовых и черноольховых древостоях меньше указанных средних значений и соответствуют действующим лесоустроительным нормативам. В еловых древостоях наблюдается систематическое занижение высот древостоев, превышающее предельно допустимые нормативы. Вероятно, это объясняется остроконечной конусовидной формой крон ели, что не позволяет при исходном пространственном разрешении 0,3 м построить цифровую модель поверхности по самым верхушкам крон деревьев ели.

Заключение. Результаты проведенной работы по оценке возможности использования ЦФС PHOTOMOD для формирования цифровых моделей высот древостоев с целью их использования при автоматизированном аналитико-измерительном дешифрировании древостоев позволяют сделать следующие выводы:

– цифровая фотограмметрическая система PHOTOMOD, ее модули PHOTOMOD DTM и PHOTOMOD dDSM могут успешно применяться для автоматизированного формирования цифровой модели высот древостоев, вычисляемой как разность цифровых моделей поверхности и рельефа;

– вычисленные значения средних высот древостоев как среднеарифметические величины цифровой модели высот для всего выдела имеют значительные систематические ошибки;

– для минимизации ошибок необходимо выполнять вычисления на основе отдельных участков цифровой модели высот, приходящихся на вершины крон деревьев, с исключением участков промежутков между кронами;

– ошибки оценки средней высоты методом аналитико-измерительного дешифрирования с использованием автоматизированной системы лесотаксационного дешифрирования на основе аэрофотоснимков сверхвысокого разрешения в сосновых, березовых и черноольховых древостоях не превышают действующих нормативных показателей;

– в еловых древостоях средняя ошибка оценки высоты больше нормативной и составляет 9,3%;

– разработанная методика и получаемые с ее использованием цифровые модели высот древостоев могут быть рекомендованы для использования при автоматизированной оценке средних высот древостоев в технологии инвентаризации лесов путем камерального аналитико-измерительного дешифрирования материалов аэрокосмических съемок при устройстве лесов с уровнем радиоактивного загрязнения более 15 Ки/км^2 и для других объектов, не вовлекаемых в хозяйственное использование.

Список литературы

1. Зорин В. П. Система и методы инвентаризации лесного фонда на основе информационных технологий, обеспечивающих устойчивое управление лесами // Труды БГТУ. 2016. № 1: Лесное хоз-во. С. 5–8.

2. Данилин И. М., Фаворская М. Н. Моделирование структуры лесного покрова и рельефа местности по данным лазерной локации // Лесная таксация и лесоустройство. 2011. № 1–2. С. 40–47.

3. Архипов В. И., Березин В. И., Черниховский Д. М. Новая технология стереоскопической таксации лесов «От съемки – к проекту» // Геопрофи. 2014. № 4. С. 17–22.

4. Рабочие правила по таксации лесов дешифровочным способом (практическое пособие таксатору-дешифровщику) / В. И. Архипов [и др.]. СПб: Леспроект, 2015. 69 с.

5. Черниховский Д. М., Алексеев А. С. Методы обработки информации радарной топографической съемки при решении задач определения высот и запасов насаждений древесных пород // Труды СПИИРАН. 2019. № 2. С. 416–443.

6. Ракурс. ЦФС PHOTOMOD [Электронный ресурс] // Ракурс: сайт. 2020. URL: https://racurs.ru/program-products/tsfs-photomod/ (дата обращения: 05.02.2020).

Reference

1. Zorin V. P. The system and methods of forest inventory based on information technologies that ensure sustainable forest management. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 1: Foresty, pp. 5–8 (In Russian).

2. Danilin I. M., Favorskaya M. N. Modeling of the structure of the forest cover and terrain according to laser location data. *Lesnaya taksatsiya i lesoustroystvo* [Forest taxation ad forest management], 2011, no. 1–2, pp. 40–47 (In Russian).

3. Arkhipov V. I., Berezin V. I., Chernikhovsky D. M. New technology fir stereoscopic forest taxation “From survey to protect”. *Geoprofi* [Geoprofi], 2014, no. 4, pp. 17–22 (In Russian).

4. Arkhipov V. I., Baskov V. I., Belov V. A., Chernikhovsky D. M., Berezin V. I. *Rabochie pravila po taksatsii lesov deshifrovochnym sposobom (prakticheskoe posobie taksatoru-deshifrirovchiku)* [Working rules for taxation of forests by decryption method (a practical guide to a taxifier-decryptor)]. St. Petersburg, Lesproekt Publ., 2015. 69 p.

5. Chernikhovskiy D. M., Alekseev A. S. Methods of processing information from radar topographic surveys when solving problems of determining the height and reserves of tree stands. *Trudy SPIIRAN* [Proceedings of SPIIRAS], 2019, no. 2, pp. 416–443 (In Russian).

6. Racurs. CFS PHOTOMOD. Available at: https:/racurs.ru/program-products/tsfs-photomod/ (accessed 02.05.2020).

Информация об авторах

Толкач Игорь Владимирович − кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: i.tolkach@belstu.by

Мицевич Людмила Александровна – начальник отдела. ГП «Белгеодезия» (220029, г. Минск, пр. Машерова, 17). E-mail: ofr@belgeodesy.by

Кравченко Ольга Валерьевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: ov_kravchenko@belstu.by

Information about the authors

Tolkach Igor’ Vladimirovich – PhD (Agriculture), Assistant Professor, Head of the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: i.tolkach@belstu.by

Mitsevich Ludmila Aleksandrovna – Head of the Department. State Enterprise “Belgeodesy” (17, Masherova str., 220029, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ofr@belgeodesy.by

Kravchenko Olga Valer’yevna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ov_kravchenko@belstu.by

Поступила 31.03.2020

УДК 630*587.2:630*521.2

И. В. Толкач, О. С. Ожич, В. В. Коцан
Белорусский государственный технологический университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТАКСАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДРЕВОСТОЕВ ПРИ АНАЛИТИКО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ДЕШИФРИРОВАНИИ

В статье приведены результаты исследования взаимосвязей между таксационными показателями чистых модальных древостоев основных лесообразующих пород Республики Беларусь. В качестве исходного материала использована выборка данных глазомерно-измерительной таксации 701 840 таксационных выделов. Результаты регрессионного анализа показали, что наибольшее влияние на средний диаметр оказывают средняя высота, полнота, запас и возраст древостоев. Для оценки сумм площадей сечений и запасов нормальных древостоев (при полноте 1,0) использованы уравнения парабол третьего и четвертого порядков регрессии данных показателей со средней высотой, которые имеют близкие к единице коэффициенты детерминации, свидетельствующие о наличии тесных связей между показателями. Коэффициенты регрессии приведенных уравнений значимы по *t*-критерию Стьюдента на 5%-ном уровне значимости. Относительная ошибка регрессии не превышает 5%.

Разработанные регрессионные уравнения являются универсальными, путем их преобразований можно получить любой показатель на основе других. При этом используется одно уравнение для всех бонитетов или разрядов высот, а для различных пород меняются лишь коэффициенты. Они могут быть успешно использованы в автоматизированной системе дешифрирования вместо нормативных таблиц.

Ключевые слова: модальный древостой, взаимосвязь, таксационный показатель, регрессионный анализ, средний диаметр, сумма площадей сечений, запас, аналитико-измерительное дешифрирование.

I. V. Tolkach, O. S. Ozhich, V. V. Kotsan
Belarusian State Technological University

THE USE OF REGRESSION MODELS FOR ASSESSING TAXATION INDICATORS OF STAND DURING ANALITICAL AND MEASURING INTERPRETATION

The results of a study of the relationships between taxation indicators of pure modal stands of the main forest-forming species of the Republic of Belarus were presented at the article. As a source material, a sample of eye-measuring taxation data of 701 840 taxation units was used. The results of the regression analysis showed that the average height, completeness, stock and age of stands have the greatest influence on the average diameter. To estimate the sums of the cross-sectional areas and growing stock of normal stands (with a completeness of 1.0), the third and fourth-order parabolic equations of the regression of these indicators with average height were applied, which have determination coefficients close to unity, indicating the presence of close relationships between the indicators. The regression coefficients of the above equations are significant by the Student t-test at a 5% significance level. The relative error of the regression does not exceed 5%.

The developed regression equations are universal; by transforming them we can get any indicator based on others. In this case, one equation is used for all bonitets or discharges of heights, and for different species only coefficients change. They can be successfully used in an automated system instead of normative tables.

Key words: modal stand, relationship, taxation indicator, regression analysis, average diameter, sum of cross-section area, growing stock, analytical and measuring interpretation.

Введение. Устойчивое управление лесами невозможно без решения ряда технологических задач, одной из которых является совершенствование системы лесоустройства, повышение точности таксации и учета лесов с использованием современных информационных технологий. При этом необходима разработка новых автоматизированных систем и методов инвентаризации лесного фонда, основывающихся на моделировании прогноза роста и актуализации данных [1].

Технологический прогресс в области аэро- и космической съемки позволяет постоянно увеличивать объем информации, получаемой

дистанционными методами, и повышать ее точность. В связи с этим большое значение приобретает разработка новых методов автоматизированного дешифрирования, основанных на использовании взаимосвязей между таксационными и дешифровочными показателями древостоев [2, 3].

Изучением закономерностей строения и взаимосвязей между дешифровочными показателями крон деревьев, таксационными показателями древостоя и его полога, разработкой регрессионных моделей и таблиц, отражающих данные взаимосвязи, занимались многие ученые: А. К. Пронин, Г. Г. Самойлович, И. Д. Дмитриев, И. М. Данилин, И. А. Лабутина, А. В. Любимов, В. И. Сухих, А. Н. Филипчук и многие другие. Накоплен большой опыт по исследованию данных взаимосвязей.

Целью работы стало изучение взаимосвязей между таксационными показателями чистых модальных древостоев основных лесообразующих пород Республики Беларусь, а также разработка регрессионных уравнений, отражающих данные взаимосвязи, и уравнений нормативных таблиц сумм площадей сечений, запасов и видовых чисел для их последующего использования в автоматизированной системе аналитико-измерительного дешифрирования древостоев с целью упрощения и повышения эффективности их использования.

Основная часть. В настоящее время существует множество исследований по изучению взаимосвязей между различными таксационными и дешифровочными показателями древостоев. Взаимосвязи между ними могут быть представлены как простыми связями, так и множественными регрессиями, учитывающими влияние 2–3 и более переменных. Например, взаимосвязь между средним диаметром, высотой и полнотой – $D = f(H, P)$, или средним диаметром, высотой, диаметром крон, сомкнутостью и классом бонитета – $D = f(h, D_к, Sp, B)$. Они могут оцениваться с помощью различных регрессионных уравнений или выражаться в виде графиков, таблиц, в том числе хода роста, дополненных дешифровочными показателями (высотой, средним диаметром крон, сомкнутостью полога, протяженностью крон, высотой до наибольшего диаметра кроны и др.) [4, 5].

Исследованию данных зависимостей для основных лесообразующих пород Республики Беларусь посвящена данная работа.

Различные нормативные таблицы, такие как стандартные таблицы сумм площадей сечений и запасов, бонитетов, разрядов высот, широко применяются в лесоустройстве и лесном хозяйстве для определения таксационных характеристик насаждений. Для их эффективного использования при расчете таксационных показателей древостоев были разработаны регрессионные уравнения, позволяющие заменить таблицы при выполнении вычислений.

Объекты исследования. Объектами исследования послужили чистые модальные древостои основных лесообразующих пород Республики Беларусь. В качестве исходных данных использованы материалы лесоустройства – повыдельная база данных насаждений лесного фонда Беларуси. Для регрессионного анализа были отобраны 701 840 таксационных выделов.

Общие статистики распределений на примере средних диаметров древостоев в исследуемых насаждениях приведены в табл. 1.

Таблица 1

Общие статистики среднего диаметра для основных лесообразующих пород

Порода	Количество объектов, шт.	Среднее значение, см	Стандартное отклонение, см	Коэффициент вариации, %	Минимальное значение, см
Сосна	572 185	23,54	5,67	24,08	10
Ель	21 206	23,98	7,09	29,55	10
Береза	59 440	17,59	5,85	33,27	10
Осина	2 252	22,87	8,21	35,91	10
Ольха черная	42 122	20,39	5,54	27,19	10
Ольха серая	71	23,72	11,91	50,24	10
Дуб	4 564	34,78	12,65	36,37	10

Результаты исследований. Для обработки данных использовались методы регрессионного анализа и составлялись регрессионные уравнения взаимосвязи между таксационными показателями древостоев. Исследование зависимостей между таксационными показателями древостоя было выполнено отдельно для основных лесообразующих пород.

Многофакторный регрессионный анализ показал, что наибольшее влияние на средний диаметр древостоя оказывает средняя высота, полнота, запас и возраст. Приведено регрессионное уравнение (1), которое отражает данную связь; параметры коэффициентов уравнений для вычисления среднего диаметра древостоев основных лесообразующих пород представлены в табл. 2.

$$D = c + a_1 \cdot H + a_2 \cdot P/H + a_3 \cdot M + a_4 \cdot A, \quad (1)$$

где D – средний диаметр древостоя, см; H – средняя высота древостоя, м; P – полнота древостоя; M – запас древостоя, м^3/га; A – средний возраст древостоя, лет.

Анализ полученных данных показал, что подобраны наиболее значимые по t-критерию Стьюдента переменные для расчета средних диаметров древостоев основных лесообразующих пород. На тесные связи между средним диаметром, средней высотой, полнотой, запасом и возрастом древостоев указывают высокие коэффициенты детерминации (R^2) – 78,3–88,6%. С увеличением средней высоты и возраста древостоя происходит увеличение среднего диаметра в среднем на 1–2 см, а влияние запаса дает отрицательную регрессию.

Таблица 2

Параметры регрессионных уравнений для вычисления среднего диаметра древостоев

Порода	Коэффициенты				
	c	a_1	a_2	a_3	a_4
Сосна	–0,0930	1,1734	–12,2123	–0,0169	0,0618
Ель	–6,1039	1,2426	42,1338	–0,0147	0,0918
Дуб	7,2621	0,6080	–143,606	–0,0130	0,2091
Береза	–6,7164	1,2129	44,9036	–0,0221	0,0930
Осина	–4,9380	1,1020	23,0754	–0,0267	0,2284
Ольха черная	–1,7034	1,0210	8,6679	–0,0116	0,1038
Ольха серая	–16,8853	1,3622	110,085	–0,0256	0,2804

Регрессионные уравнения зависимости класса бонитета (индекса класса бонитета) от возраста и средней высоты древостоя построены на основе бонитировочных таблиц профессора М. М. Орлова [6]. Для аппроксимации В. П. Машковским и И. В. Толкачем применена функция, предложенная Э. А. Митчерлихом [7], в которую введен дополнительный параметр, позволяющий учесть индекс класса бонитета.

Семенные насаждения:

$$H = -3{,}79246 + (1{,}73549 - e^{-0{,}021318 \cdot A})^{2{,}45297} \times \times (11{,}27416 - 1{,}17246 \cdot IKB); \quad (2)$$

порослевые насаждения:

$$H = -2{,}41987 + (1{,}16697 - e^{-0{,}0248226 \cdot A})^{1{,}24252} \times \times (32{,}5082 - 3{,}4923 \cdot IKB), \quad (3)$$

где H – средняя высота древостоя, м; A – средний возраст древостоя, лет; IKB – индекс класса бонитета.

Коэффициенты регрессии значимы по t-критерию Стьюдента на 5%-ном уровне значимости. Относительная ошибка регрессии не превышает 5%. Коэффициент детерминации составляет 98–99%. Полученные уравнения могут применяться в виде модели на ЭВМ для определения высоты древостоя при известном среднем возрасте и классе бонитета, а также для определения индекса класса бонитета в зависимости от средней высоты и среднего возраста древостоя с последующим преобразованием в класс бонитета.

Индексы классов бонитета приняты следующим образом: для первого класса бонитета – 1, для следующих классов добавляется или вычитается единица. В качестве индекса класса бонитета можно использовать индексы, предложенные профессором О. А. Атрощенко, высоты семенных древостоев в возрасте 100 лет и порослевых в возрасте 50 лет ($H100$, $H50$).

Для оценки сумм площадей сечений и запасов нормальных древостоев применяются стандартные таблицы [8], на основе которых оцениваются также полноты и запасы таксируемых древостоев. В качестве регрессионных уравнений связей сумм площадей сечений для полноты 1,0 и запасов нормальных древостоев с высотой применены параболы третьего и четвертого порядков:

$$G_н = c + a_1 \cdot H + a_2 \cdot H^2 + a_3 \cdot H^3, \quad (4)$$

$$M_н = c + a_1 \cdot H + a_2 \cdot H^2 + a_3 \cdot H^3 + a_4 \cdot H^4, \quad (5)$$

где $G_н$ – сумма площадей сечений нормального древостоя, м^2; $M_н$ – запас нормального древостоя, м^3; H – средняя высота древостоя, м.

Параметры уравнений для расчета этих таксационных показателей для основных лесообразующих пород приведены в табл. 3, 4.

Таблица 3

Параметры регрессионных уравнений для вычисления сумм площадей сечений нормальных древостоев

Порода	Коэффициенты			
	c	a_1	a_2	a_3
Сосна	3,4709	3,5964	–0,1274	0,0016
Ель	–0,6896	3,3437	–0,0826	0,0008
Дуб	3,8245	2,0145	–0,0387	0,0003
Береза	6,0969	1,4938	–0,0248	0,0003
Осина	0,5828	2,4333	–0,0567	0,0006
Ольха черная	1,7634	1,7901	–0,0017	–0,0005

Таблица 4

Параметры регрессионных уравнений для вычисления запасов нормальных древостоев

Порода	Коэффициенты				
	c	a_1	a_2	a_3	a_4
Сосна	3,8274	5,8038	1,3252	–0,0504	0,0007
Ель	–32,874	12,586	0,4965	–0,0056	–
Дуб	–3,7296	6,1238	0,584	–0,0062	–
Береза	–14,244	10,239	0,1775	–	–
Осина	–20,976	9,1445	0,3562	–0,0019	–
Ольха черная	16,992	–2,1226	1,2047	–0,0174	–

Все коэффициенты регрессии приведенных уравнений значимы по *t*-критерию Стьюдента на 5%-ном уровне значимости. Относительная ошибка регрессии не превышает 5%. Коэффициент детерминации составляет 99–100%.

Заключение. Полученные результаты исследования взаимосвязей между таксационными показателями древостоев основных лесообразующих пород позволяют сделать вывод, что существует тесная связь между средним диаметром, средней высотой, полнотой, запасом и возрастом древостоев, на это указывают высокие коэффициенты детерминации (R^2) – 78,3–88,6%. Разработанные регрессионные уравнения дают возможность оценить (моделировать) средний диаметр древостоя, который нельзя получить путем прямых измерений видимых на снимках крон деревьев и полога древостоя.

Для оценки сумм площадей сечений и запасов нормальных древостоев (при полноте 1,0) использованы уравнения парабол третьего и четвертого порядков регрессии данных показателей со средней высотой, которые имеют близкие к единице коэффициенты детерминации, свидетельствующие о наличии тесных связей между показателями, и могут быть успешно использованы в автоматизированной системе дешифрирования вместо нормативных таблиц.

Разработанные регрессионные уравнения являются универсальными, путем их преобразований можно получить любой показатель на основе других. При этом используется одно уравнение для всех бонитетов или разрядов высот, а для различных пород меняются лишь коэффициенты. Необходимо отметить, что вычисленные по данным уравнениям значения несколько отличаются от табличных, приведенных в первоисточниках, так как таблицы имеют некоторую ступенчатость из-за округления показателей до целых значений.

Список литературы

1. Зорин В. П. Система и методы инвентаризации лесного фонда на основе информационных технологий, обеспечивающих устойчивое управление лесами // Труды БГТУ. 2016. № 1: Лесное хоз-во. С. 5–8.

2. Бахур О. С. Взаимосвязи между таксационными и дешифровочными показателями в сосновых древостоях I и Iа классов бонитета // Труды БГТУ. 2013. № 1: Лесное хоз-во. С. 13–15.

3. Толкач И. В., Бахур О. С. Измерительное дешифрирование и оценка таксационных показателей сосновых древостоев по цифровым снимкам сверхвысокого разрешения // Труды БГТУ. 2014. № 1: Лесное хоз-во. С. 48–51.

4. Сухих В. И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве: учебник. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 392 с.

5. Коцан В. В. Взаимосвязи между таксационными показателями деревьев в кругах конкуренции на примере сосняков мшистых искусственного происхождения // Труды БГТУ. 2014. № 1: Лесное хоз-во. С. 19–22.

6. Орлов М. М. Лесная таксация. Л.: Изд-во журн. «Лесн. хоз-во и лесн. пром-сть», 1929. 532 с.

7. Машковский В. П., Толкач И. В. Система кривых для аппроксимации связи высот и диаметров в разрядных таблицах // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 1996. Вып. 3. С. 71–74.

8. Технические требования при лесоустройстве. Отвод и таксация лесосек в лесах Республики Беларусь: ТКП 622-2018 (33090). Введ. 12.07.2018. Минск: М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 2018. 96 с.

References

1. Zorin V. P. The system and methods of forest fund inventory on the bases of information technologies providing sustainable forest management. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 1: Forestry, pp. 5−8 (In Russian).

2. Bakhur O. S. Relationships between taxation and decoding indicators in pine stands of I and Ia grade bonitets. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 1: Forestry, pp. 13−15 (In Russian).

3. Tolkach I. V., Bakhur O. S. Measuring interpretation and assessment of taxation indicators of pine stands using digital images of ultra-high resolution. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 1: Forestry, pp. 48−51 (In Russian).

4. Sukhikh V. I. *Aerokosmicheskie metody v lesnom khozyaystve i landshaftnom stroitel'stve* [Aerospace methods in forestry and landscape construction]. Yoshkar-Ola, MarSTU Publ., 2005. 392 p.

5. Kotsan V. V. Interconnections between taxation indicators of trees in competition circles on the example of mossy pine forests of artificial origin. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 1: Forestry, pp. 19−22 (In Russian).

6. Orlov M. M. *Lesnaya taksatsyia* [Forest taxation]. Leningrad, Publishing House of Journal "Forestry and Forestry Industry", 1929. 532 p.

7. Mashkovsky V. P., Tolkach I. V. Curve system for approximating the relationship of heights and diameters in bit tables. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], Series 1, Forestry, 1996, issue 3, pp. 71−74 (In Russian).

8. TKP 622-2018 (33090). Technical requirements in forest management. The allocation and inventory of cutting areas in con-ducting forest management activities in the forests of the Republic of Belarus. Minsk, Ministry of forestry of the Republic of Belarus Publ., 2018. 96 p. (In Russian).

Информация об авторах

Толкач Игорь Владимирович − кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова 13а, Республика Беларусь). E-mail: i.tolkach@belstu.by

Ожич Ольга Светославовна − кандидат сельскохозяйственных наук, ассистент кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова 13а, Республика Беларусь). E-mail: bakhur@belstu.by

Коцан Владимир Васильевич − кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова 13а, Республика Беларусь). E-mail: wolodia250@belstu.by

Information about the authors

Tolkach Igor' Vladimirovich − PhD (Agriculture), Assistant Professor, Head of the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: i.tolkach@belstu.by

Ozhich Olga Svetoslavovna − PhD (Agriculture), Assistant Lecturer, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bakhur@belstu.by

Kotsan Vladimir Vasil'yevich − PhD (Agriculture), Senior Lecturer, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: wolodia250@belstu.by

Поступила 31.03.2020

ЛЕСНАЯ ЭКОЛОГИЯ И ЛЕСОВОДСТВО

УДК 630*182.4; 630*161.32

Г. Я. Климчик, О. Г. Бельчина, Д. В. Шиман, М. В. Юшкевич
Белорусский государственный технологический университет

ИЗМЕНЕНИЕ ВИДОВОГО РАЗНООБРАЗИЯ В СОСНЯКАХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СИСТЕМ РУБОК ГЛАВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ, ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЯ И ОЧИСТКИ ЛЕСОСЕК ОТ ПОРУБОЧНЫХ ОСТАТКОВ

Сплошнолесосечная рубка сосновых древостоев оказывает негативное воздействие на состояние живого напочвенного покрова. Валка и трелевка деревьев, воздействие лесозаготовительной техники и последующее искусственное возобновление вызывают значительные повреждения и резкое снижение проективного покрытия по травяно-кустарничковому и мохово-лишайниковому ярусам. При этом живой напочвенный покров оказывается вне влияния материнского полога древостоя и создаваемого им микроклимата, где проявляется закономерность в направлении массового отмирания мхов и обильного развития светолюбивой травянистой растительности.

В ходе несплошных рубок сохранность живого напочвенного покрова и видового разнообразия тенелюбивых видов претерпевает незначительные изменения. Покрытие видов светолюбивых увеличивается только на открытых участках. После завершения рубки и начала смыкания крон проективное покрытие светолюбивых снизится, факультативные гелиофиты стабилизируются, а тенелюбивые – восстановятся.

При сплошнолесосечных рубках с оставлением измельченных и разбросанных по всей площади порубочных остатков в большей степени сохраняется минеральный баланс участка за счет их дальнейшего разложения равномерно по площади в сравнении со сбором порубочных остатков в кучи или валы, при которых создаются условия опасности возникновения лесных пожаров и очагов вредителей леса.

При принятии решения об оставлении порубочных остатков или их удалении в первую очередь следует принимать во внимание санитарное состояние объекта и его класс пожарной опасности, так как наличие порубочных остатков незначительно влияет на смену видового разнообразия и развитие живого напочвенного покрова.

Ключевые слова: сплошнолесосечная и равномерно-постепенная рубки, видовое разнообразие, сукцессии, живой напочвенный покров, порубочные остатки.

G. Ya. Klimchik, O. G. Bel'chyna, D. V. Shyman, M. Yu. Yushkevich
Belarusian State Technological University

CHANGE OF SPECIES DIVERSITY IN PINEIES DEPENDING ON MAIN USE SYSTEMS, FOREST RECOVERY AND CLEANING OF FORESTRY FROM CUTTING RESIDUES

The clear-cutting of pine stands has a negative effect on the condition of the living ground cover. Felling and skidding of trees, the impact of forestry equipment and subsequent artificial regeneration cause significant damage and a sharp decrease in projective cover along the grass-shrub layer and the moss-lichen layer. The living ground cover is outside the influence of the mother canopy of the stand and the microclimate created by it. At the same time, a pattern manifests itself in the direction of the mass extinction of mosses and the abundant development of photophilous grassy vegetation.

During incomplete logging, the safety of the living ground cover and the species diversity of shade-loving species undergoes minor changes. The coverage of photophilous species increases only in open areas. After the cutting is completed and the crowns begin to close, the projective coating of the photophilous will decrease, the optional heliophytes will stabilize, and the shade-loving ones will recover.

In the case of clear-cutting operations, leaving chopped residues crushed and scattered over the entire area, the site's mineral balance is preserved to a greater extent due to their further decomposition uniformly over the area in comparison with the collection of cutting residues in piles or shafts, under which there are conditions of danger of forest fires and foci forest pests.

When deciding whether to leave logging residues or to remove them, the sanitary condition of the facility and its fire hazard class should be taken into account in the first place, since the presence of felling residues slightly affects the change in species diversity and the development of living soil cover.

Key words: clear-cutting, species diversity, successions, living ground cover, logging residues.

Введение. Увеличение возраста древостоев способствует изменению лесного биогеоценоза в целом и, следовательно, в соответствии с этим изменяются условия обитания растений. Вырубка – кратковременная (по сравнению с периодом восстановления леса до климакса) стадия, специфика которой заключается в остаточном влиянии вырубленных деревьев, а также в особенности почвенных процессов.

В зависимости от вида рубки видовой состав живого напочвенного покрова и его проективное покрытие изменяются [1–6].

Исследования и анализ изменений видового разнообразия в живом напочвенном покрове в зависимости от вида рубки проводился нами на пробных площадях с учетом типа леса, расположения участка в лесном массиве, способа восстановления и очистки лесосек от порубочных остатков при выполнении задания Контракта BFDP/GEF/CQS/16/29-34/18 и задания 56 ГПФОИ «Ресурсы растительного и животного мира».

Основная часть. Для экспериментальных исследований были подобраны объекты в сосняке кисличном (возраст 115 лет), сосняке орляковом (возраст 115 лет). В каждом типе леса были проведены сплошнолесосечные рубки без сохранения подроста с последующим созданием лесных культур и равномерно-постепенные рубки в двух вариантах: с удалением или неудалением порубочных остатков. Изучение видового разнообразия проводилось до рубок и после них по общепринятой методике геоботанических исследований А. Г. Воронова с применением методов Раункиера и использованием шкал О. Друдэ и П. Д. Ярошенко [7].

Сплошнолесосечная рубка способствует быстрому внедрению луговой растительности в лесные формации и резкому исчезновению лесной растительности. Процесс изменения вырубок условно можно разбить на два этапа: до 10 лет и свыше 10 лет после сплошной рубки. Первый этап характеризуется резким снижением проективного покрытия лесных растений или их полным исчезновением и активным разрастанием луговых видов. Второй этап характеризуется постепенным исчезновением луговой травянистой растительности и возобновлением лесных видов [1, 8].

При сплошнолесосечной рубке древостоев в сосняках происходит негативное воздействие на состояние живого напочвенного покрова. Валка и трелевка деревьев, воздействие лесозаготовительной техники и последующее искусственное возобновление вызывают значительные повреждения и резкое снижение проективного покрытия по травяно-кустарничковому и мохово-лишайниковому ярусу. Живой напочвенный покров оказался в новых условиях – вне влияния материнского полога древостоя и создаваемого им микроклимата. По данным И. Д. Юркевича и Э. П. Ярошевич [9], в этих условиях масса живого напочвенного покрова может снижаться по сравнению с исходным насаждением почти в 2 раза. На вырубке увеличивается степень освещенности, возрастает интенсивность испарения и, как следствие, уменьшается влажность почвы, особенно ее верхних горизонтов, возрастает суточный диапазон и скорость колебаний температуры воздуха и верхних слоев почвы, усиливается негативное воздействие ветра, что приводит к резкому и кардинальному изменению видового состава живого напочвенного покрова. Смена живого напочвенного покрова наблюдается уже в первый год после рубки. При этом проявляется закономерность в направлении массового отмирания мхов и обильного развития светолюбивой травянистой растительности. В междурядьях встречаются редкие угнетенные куртины *Vaccínium myrtíllus* и *Vaccínium vítis-idaéaéa*. Выпадают типичные мезофиты с поверхностной корневой системой, а также сциофиты, которые нормально развиваются только в условиях затенения при рассеянном свете, около пней, что подтверждается исследованиями [4, 5, 10, 11].

Эдификационная роль лесных видов ослабевает по отношению к представителям сорных и луговых растений. Под защитой пней сохраняются некоторые виды факультативных гелиофитов (*Maianthemum bifolium, Lycopódium annotínum, Óxalis acetoséllа*), однако сплошного фона они уже не образуют. Практически полностью исчезают мхи, за исключением *Polytrichum commune,* который способен выносить условия вырубки.

Происходит интенсивное зарастание междурядий – *Pteridium aquilinum, Calamagróstis epigéjos, Festuca ovina, Callúna vulgáris*, встречаются *Fragaria vesca, Verónica officinalis, Achillea millefolium, Lótus corniculátus, Chamaenérion angustifolium* и особенно *Rúbus idáeus.*

С увеличением срока вырубки происходят дальнейшие изменения в живом напочвенном покрове и подстилке.

Проективное покрытие травянистыми растениями увеличивается с 10–20% в первый год до 70–90% к четвертому году. В первый год после рубки напочвенный покров был представлен

небольшими куртинами *Cárex, Júncus, Poaceae, Trientális, Melampýrum, Vaccínium, Geranium. Bryophyta* сохранились возле пней, в местах затенения или у стен леса. В местах нарезки плужных борозд для посадки лесных культур живой напочвенный покров полностью отсутствует, что согласуется с исследованиями [12, 13].

Разрастающаяся растительность семейства злаковых увеличивает свою площадь покрытия и вытесняет лесные виды, практически полностью исчезает моховой покров. К злакам добавляется самосев подлесочных (*Sórbus aucuparia, Frángula alnus, Rúbus idáeus*), а также лесообразующих лиственных пород *Bétula pendula, Pópulus tremula*.

На четвертый год после рубки отмечено исчезновение участков с минерализованной поверхностью почвы. В отличие от вырубки первого года, образовался хорошо развитый травяно-кустарничковый ярус с обилием злаков. Совместно с видами семейства злаковых в травостое стали преобладать виды вегетативного размножения (*Rúbus idáeus, Rúbus saxátilis* и др.), возрос удельный вес видов семенного происхождения (*Chamaenérion angustifolium, Calamagrostis, Viola* и др.). Преобладающими видами на вырубке стали представители родов *Deschampsia, Calamagrostis, Chamaenérion angustifolium*. Задернение злаками усилилось. Их доля в проективном покрытии увеличилась до 35%.

Таким образом, в первые годы после рубки на месте постоянных спутников древостоя (*Vaccínium myrtillus, Vaccínium vítis-idaéa, Pýrola rotundifólia*, лесных видов мхов и др.), важных с точки зрения сохранения стабильности лесных фитоценозов, появляются представители родов *Calamagrostis, Poaceae, Deschampsia, Agrostis* и других злаков с примесью заносных видов.

Согласно результатам ранее проведенных исследований и литературных источников [10, 11, 12, 14, 15, 16], видовое разнообразие живого напочвенного покрова через 7 лет представлено преимущественно семейством сложноцветных. Есть вероятность заселения и активного освоения площади злаками, а изменения количества видов мхов и их проективного покрытия пока не происходит. Возрастает встречаемость видов светолюбивых растений (в среднем на 15%) и их удельный вес в проективном покрытии почвы.

На вырубках из-под смешанных древостоев с участием *Pinus silvestris, Pícea ábies, Bétula péndula* и *Pópulus trémula*, на богатых почвах процесс формирования древостоев *Pínus sylvéstris* до перевода в покрытые лесом земли протекает в непредсказуемом направлении независимо от удаления или неудаления порубочных остатков, главной породы создаваемых лесных культур и количества агротехнических уходов. Обычно формируются насаждения *Pineta – Piceeta – Betuleta – Populeta*, с различным процентным участием этих пород, которое определяется породным составом вырубленного древостоя, насаждений смежных выделов, повторяемостью семенных лет этих лесообразующих пород и другими факторами.

Подлесочный ярус возобновляется различными видами рода *Sálix,* а также *Sórbus aucupária, Frángula álnus* и в довольно значительном количестве *Rúbus idaeus.*

Исследованиями отмечено, что с возрастом в лесных культурах происходит изменение в сторону ухудшения прежде всего светового и водного режима. Загущенность культур, перехват кронами деревьев поступления света и влаги, а также накопление многолетней лесной подстилки становятся препятствием к развитию живого напочвенного покрова под пологом насаждения, что подтверждается ранее проведенными нашими исследованиями [10, 14, 17, 18]. С увеличением возраста древостоя получают все большее распространение виды лесной растительности, а число луговых и опушечных видов и их общее проективное покрытие уменьшается.

К 20-му году после сплошнолесосечной рубки, в связи со смыканием крон в рядах и междурядьях лесных культур и значительным уменьшением освещенности под пологом, происходит выпадение светолюбивых видов, в дальнейшем постепенно появляются мхи и характерные лесные виды.

В результате отдельные участки живого напочвенного покрова выпадают и он становится мертвым. В условиях недостатка освещенности важную роль в регуляции видового состава и численности в нижних ярусах растительности начинает приобретать конкуренция между корневыми системами различных видов растений за влагу и питательные вещества. В это время состав и структура живого напочвенного покрова находится в стадии интенсивной перестройки, происходит отсев, сокращение обилия и встречаемости некоторых светолюбивых видов. Травяно-кустарничковый ярус выражен слабо, без доминантов и представлен в основном многолетними травянистыми растениями, располагающимися по площади редко, отдельными экземплярами. Фон в основном определяют зеленые мхи (*Hylocomium splendens, Dicranum polysetum, Ptílium crísta-castrénsis* с преобладанием последнего).

Несплошные рубки не оказывает существенного влияния на изменение видового разнообразия и сохранность живого напочвенного покрова по сравнению со сплошнолесосечными. Это проявляется в виде изменений фитоценотической структуры, в зависимости от повышения встречаемости, проективного покрытия и обилия

светолюбивых видов, особенно злаков, при снижении аналогичных показателей факультативных гелиофитов. Несплошные рубки леса незначительно изменяют проективное покрытие: в сторону уменьшения на 4–7% – по травяно-кустарничковому ярусу, на 10–15% – по мохово-лишайниковому. После первого приема несплошных рубок количество видов в основном увеличивается за счет заселения площади разнообразием рода злаков среди криптофитов. Основные изменения происходят в связи с прорубкой технологических волоков и работой на них лесозаготовительной техники.

В основном на волоках и в местах образования окон появляются растения гелиофиты: *Chamaenerion angustifolium L.*, *Leontodon autumnalis L.*, *Poa annua L.*, *Rumex acetosella L.*, *Solidago virgaaurea L.*, *Veronica officinalis L.* и др.

Ко второму приему рубки ярус мхов адаптируется к изменению условий освещенности, что выражается в постепенном повышении проективного покрытия и восстановлении исходного состояния через один-два года после проведения второго приема рубки. Небольшой прирост покрытия происходит за счет *Polytrichum juniperinum* и *Hylocomium splendens*. В последующем, согласно ранее проведенным нами исследованиям [11, 14, 17], восстановление травяно-кустарничкового яруса после рубок происходит быстрее, чем мохово-лишайникового; но все же полностью живой напочвенный покров не успевает восстановиться до проведения очередного приема рубки. Его восстановление возможно только через 5–8 лет после завершения последнего приема рубок.

Травяно-кустарничковый ярус увеличивает покрытие после двух приемов в 1,8 раза в основном за счет появления и разрастания *злаков*, а также за счет разрастания *Vaccinium vitis-idaea*, *Luzula pilosa*, *Pteridium aquilinum*, появления *Chamaenerion angustifolium* и большого количества других не характерных для лесного сообщества видов (*Anthemis tinctoria*, *Galium verum*, *Hipericum perforatum*, *Jasione montana*, *Leontodon autumualis*, *Lepidotheca suaveolens*, *Rumex acetosella* и др.). Уже через два-три года после начала рубки проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса превысит покрытие мохово-лишайникового яруса.

Проективное покрытие яруса гелиофитов через четыре года после начала рубки возрастает приблизительно в 1,5 раза, а яруса тенелюбивых несколько снижается. В дальнейшем покрытие светолюбивых растений продолжит расти, тенелюбивых – стабилизируется, а факультативные гелиофиты восстановится.

Значительных изменений встречаемости и проективного покрытия растений не происходит. У части растений эти показатели после рубки снижаются, через шесть лет восстанавливаются до исходного уровня с незначительными колебаниями. Даже в период максимального развития травянистой растительности, способной к задернению, она развита слабо и естественному возобновлению *Pínus sylvéstris* существенного препятствия не оказывает. Поэтому накопление самосева возможно в течение длительного периода (10–12 лет после рубки), пока не сомкнется сосновый молодняк, что подтверждается нашими и литературными источниками [4, 18].

Анализ распределения видов живого напочвенного покрова по эколого-фитоценотическим группам показал, что на ранних этапах формирования насаждений в покрове будут преобладать виды опушечно-лесные, которые составят до 41–44% от общего количества. Примерно четвертая часть будет представлена опушечно-луговыми видами. В высокополнотных приспевающих и спелых насаждениях будут доминировать лесные виды – до 41–54%, а в модальных и низкополнотных насаждениях – опушечно-луговые.

При рубках леса образуется значительное количество порубочных остатков (до 15% от запаса вырубаемой древесины). Оставление порубочных остатков с равномерным распределением их по площади и дальнейшим перегниванием на лесосеке в некоторой степени позволяет сохранять плодородие лесных почв и обеспечивает в будущем рост лесных насаждений без снижения их продуктивности, в отличие от лесных участков с другими способами обращения с порубочными остатками. Кроме обогащения почвы элементами питания и органическим веществом, порубочные остатки выполняют роль мульчи, что позволяет в большей степени сохранять почвенную влагу, особенно на начальном этапе формирования молодого насаждения, и способствовать образованию уникальных экологических ниш. На притененных и, как следствие, на более увлажненных участках находят себе комфортные условия для сохранения и развития гигрофиты отделов *Magnoliophyta, Polypodióphyta, Bryophyta.* Эти виды впоследствии при смыкании крон постепенно восстанавливают свое господство в лесном сообществе, что способствует сохранению биоразнообразия в целом.

Однако при принятии решения об оставлении порубочных остатков нужно принимать во внимание и возможность размножения и обитания в этих нишах ксилофагов-вредителей, которые могут спровоцировать гибель как отдельных деревьев, так и, в случае массового размножения, всего насаждения. В этом случае следует учитывать санитарное состояние территории [19].

Заключение. При сплошных рубках происходят значительные процессы сукцессии

живого напочвенного покрова, в большей степени зависящие от влияния смены климатических условий. При этом видовое разнообразие меняется в направлении *теневыносливые – факультативные гелиофиты – светолюбивые.* При сплошнолесосечных рубках из-под смешанных древостоев с участием *Pínus sylvéstris, Pícea ábies, Bétula péndula* и *Pópulus trémula* на относительно богатых почвах процесс формирования последующих сосновых древостоев до перевода в покрытые лесом земли будет протекать в непредсказуемом направлении независимо от главной породы создаваемых лесных культур, количества агротехнических уходов и удаления или неудаления порубочных остатков.

Обычно формируются насаждения *Pineta – Picaeta – Betuleta – Populeta* с различным процентным участием в составе этих пород, который определяется составом вырубленного древостоя, породным составом насаждений смежных выделов, повторяемостью семенных годов этих лесообразующих пород и другими факторами.

В ходе несплошных рубок сохранность живого напочвенного покрова и видового разнообразия тенелюбивых видов претерпевает незначительные изменения. Покрытие светолюбивых видов увеличивается только на открытых участках. После завершения рубки и начала смыкания крон проективное покрытие светолюбивых снизится, факультативные гелиофиты стабилизируются, а тенелюбивые – восстановится.

Оставление порубочных остатков с равномерным распределением их по площади и дальнейшим перегниванием на лесосеке в некоторой степени позволяет сохранять плодородие лесных почв и обеспечивает в будущем рост лесных насаждений без снижения их продуктивности сохранять почвенную влагу, особенно на начальном этапе формирования молодого насаждения, и способствовать образованию уникальных экологических ниш для сохранения и развития влаголюбивых организмов (*Magnoliophyta, Polypodióphyta, Bryophyta*), которые постепенно восстанавливают свое проективное покрытие в лесном сообществе и способствуют сохранению биоразнообразия в целом.

Рассматривая сохранность и развитие живого напочвенного покрова и видового разнообразия в целом, при решении выбора способа рубки, обращения с порубочными остатками и метода лесовосстановления необходимо учитывать следующее:

– организационно-технические элементы рубок;

– лесоводственно-таксационную характеристику насаждения;

– условия местопроизрастания вырубаемого насаждения;

– санитарное состояние объекта до и после рубок;

– наличие или отсутствие очагов вредителей и болезней леса на близлежащих территориях;

– степень риска возникновения пожара на вырубленной площади;

– наличие зарегистрированных видов, находящихся под разной категорией охраны.

Список литературы

1. Крышень А. М. К разнообразию растительных сообществ вырубок Карелии // Проблемы лесоведения и лесоводства: материалы Третьих Мелеховских чтений, посвященных 100-летию со дня рождения И. С. Мелехова, г. Архангельск, 15–16 сент. 2005 г. Архангельск, 2005. С. 24–27.

2. Рай Е. А., Бурова Н. В., Сластников С. И. Влияние оставления деревьев при сплошной рубке на флористическое разнообразие [Электронный ресурс] // Научная электронная библиотека «Киберленинка». URL: https://cyberleninka.ru (дата обращения: 05.12.2019).

3. Древесный отпад и биоразнообразие на участках выборочных рубок в Ленинградской области / В. Г. Сергиенко [и др.] // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2015. № 3. С. 4–19.

4. Санников С. Н. Типы вырубок, динамика живого напочвенного покрова и его роль в последующем возобновлении сосны в Припышминских борах-зеленомошниках // Электронный архив УГЛТУ. URL: http://elar.usfeu.ru (дата обращения: 29.11.2019).

5. Маленко А. А., Малиновских А. А. Влияние возраста древостоя на изменения живого напочвенного покрова // Лесное хозяйство: аграрный вестник Урала. 2011. № 10 (89). С. 78–81.

6. Рунова Е. М., Савченкова В. А. Исследование влияния живого напочвенного покрова на характер возобновления вырубок в среднем Приангарье // Успехи современного естествознания. 2008. № 5. С. 65–67.

7. Федорук А. Т. Ботаническая география. Полевая практика. Минск: Изд-во БГУ, 1976. 224 с.

8. Сахаров М. И. О зависимости развития лесных травянистых растений от условий обитания // Сборник научных трудов Института биологии академии наук БССР. 1951. Вып. II. С. 155–170.

9. Юркевич И. Д., Ярошевич Э. П. О продуктивности живого напочвенного покрова под пологом и на вырубках в некоторых сосновых типах леса // Ботаника: сб. ст. 1971. Вып. XIII. С. 50–61.

10. Климчик Г. Я., Пашкевич Л. С. Трансформация и восстановление живого напочвенного покрова в сосняках, пройденных рубками леса // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2007. Вып. XV. С. 108–112.

11. Сукцессии лесной растительности в связи с лесохозяйственной деятельностью / Г. Я. Климчик [и др.] // Труды БГТУ. 2011. № 1 (139): Лесное хоз-во. С. 92–96.

12. Сергиенко В. Г., Соколова О. И. Динамика живого напочвенного покрова и естественное лесовозобновление на вырубках // Лесной журнал. 2012. № 2. С. 34–41.

13. Биота искусственных лесов Оренбургского Предуралья / М. А. Сафонов [и др.]. Оренбург: Университет, 2013. 176 с.

14. Шиман Д. В., Меркуль Г. В. Лесоводственно-экологические основы проведения постепенных рубок в сосняках // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2008. Вып. XVI. С. 102–106.

15. Забелло К. Л., Мироненко А. Я., Навойчик Л. Л. Изменение кислотности почвы и живого напочвенного покрова в зависимости от возраста сосновых насаждений // Лесоведение и лесное хозяйство. 1973. Вып. 7. С. 16–21.

16. Ермолова Л. С. Динамика травяного покрова в связи с лесоводственными процессами. М.: Наука, 1981. 137 с.

17. Шиман Д. В., Меркуль Г. В., Пашкевич Л. С. Особенности формирования живого напочвенного покрова в процессе проведения постепенных рубок // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2008. Вып. XV. С. 146–150.

18. Юшкевич М. В., Пашкевич Л. С. Динамика нижних ярусов растительности сосняка орлякового при проведении группово-постепенной рубки // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. ИЛ НАН Беларуси. Вып. 71. Гомель: ИЛ НАН Беларуси, 2011. С. 196–206.

19. Мошников С. А., Ананьев В. А. Запас древесного детрита в сосновых насаждениях Южной Карелии // Сборник трудов СПбНИИЛХ. 2013. № 2. С. 22–28.

References

1. Kryshen' A. M. To the diversity of plant communities of felling in Karelia. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva: materialy Tret'ikh Melekhovskikh chteniy, posviashchennykh 110-letiyu so dnia rozhdeniya I. S. Melekhova* [Problems of forest science and forestry: materials of the Third Melekhov readings devoted to the 100th anniversary of the birth of I. S. Melekhov]. Arkhangelsk, 2005. Pp. 24–27 (In Russian).

2. Ray E. A., Burova N. V., Slastnikov S. I. *Vliyane ostavleniya derev'ev pri sploshnoy rubke na floristicheskoe raznoobrazie* [The effect of tree abandonment during clear cutting on floristic diversity]. Available at: https://cyberleninka.ru/rus/scientific electronic library "Cyberleninka"_2012.html (accessed 05.12.2019).

3. Sergienko V. G., Ivanov A. M., Vlasov R. V., Antonov O. I. Tree loss and biodiversity on sites of selective fellings in Leningrad region. *Trudy Sankt-Peterburgckogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyastva* [Proceedings of the St. Petersburg research Institute of forestry], 2015, no. 3, pp. 4–19 (In Russian).

4. Sannikov S. N. *Tipy vyrubok, dinamika zhivogo napochvennogo pokrova i ego rol' v posleduyushchem vozobnovlenii sosny v Pripyshminskikh borakh-zelenomoshnikakh* [Types of felling, the dynamics of live ground cover and its role in the subsequent renewal of pine in Pripishminskiy pine forest with green mosses]. Available at: http://elar.usfeu.ru (accessed 29.11.2019).

5. Malenko A. A., Malinovsky A. A. Influence of forest stand age on changes in live ground cover. *Lesnoye khozyaystvo: agrarnyy vestnik Urala* [Forestry: agricultural journal of Ural], 2011, no. 10 (89), pp. 78–81 (In Russian).

6. Runova E. M., Savchenkova V. A. Study of the influence of live ground cover on regeneration nature of fellings in the middle Angara region. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Achievements in modern natural science], 2008, no. 5, pp. 65–67 (In Russian).

7. Fedoruk A. T. *Botanicheskaya geografiya. Polevaya praktika* [Botanical geography. Field practice]. Minsk, BSU Publ., 1976. P. 224.

8. Sakharov M. I. About dependence of the development of forest herbaceous plants from live environment. *Sbornik nauchnykh trudov Instituta biologii Akademii nauk BSSR* [Collection of scientific works of the Institute of biology of the Academy of Sciences of BSSR], 1951, vol. II, pp. 155–170 (In Russian).

9. Yurkevich I. D., Yaroshevich E. P. On the productivity of live ground cover under the canopy and during the felling in some pine forests. *Botanika* [Botany], 1971, issue XIII, pp. 50–61 (In Russian).

10. Klimchik G. Ya., Pashkevich L. S. Transformation and restoration of live ground cover in pine forests subject to deforestation. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forestry, 2007, issue XV, pp. 108–112 (In Russian).

11. Klimchik G. Ya., Pashkevich L. S., Shiman D. V., Mukhurov L. I. Succession of forest vegetation in connection with forestry activities *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2011, no. 1: Forest and Woodworking Industry, pp. 92–96 (In Russian).

12. Sergienko V. G., Sokolova O. I. Dynamics of live ground cover and natural forest regeneration during cutovers. *Lesnoy zhurnal* [Forest journal], 2012, no. 2, pp. 34–41 (In Russian).

13. Safonov M. A., Rusakov A. V., Leniova E. A., Malenkova A. S. *Biota iskusstvennykh lesov Orenburgskogo Predles'ya* [Biota of artificial forests of Orenburg cis-Ural regions]. Orenburg, University Publ., 2013. 176 p.

14. Shiman D. V., Merkul' G. V. Forest-ecological bases of gradual felling in pine forests. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forestry, 2008, issue XVI, pp. 102–106 (In Russian).

15. Zabello K. L., Mironenko A. Ya., Navoichik L. L. The change in the acidity of soil and live ground cover depending on the age of pine stands, forest science and forestry. *Lesovedenie i lesnoe khozyaystvo* [Forest and Woodworking Industry], 1973, issue 7, pp. 16–21 (In Russian).

16. Ermolova L. S. *Dinamika travyanogo pokrova v svyazi s lesovodstvennymi processami* [Dynamics of grass cover in connection with forestry processes]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 137 p.

17. Shiman D. V., Merkul' G. V., Pashkevich L. S. Features of the formation of live ground cover in the process of gradual felling. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forestry, 2008, issue XV, pp. 146–150 (In Russian).

18. Yushkevich M. V., Pashkevich L. S. Dynamics of vegetation understorey of Pinetum pteridiosum during group-gradual felling. *Probemy lesovedeniya i lesovodstva: sb. nauch. tr. IL NAN Belarusi* [Problems of forest science and forestry: Compilation of scientific works of the Forest Institute of National Academy of Sciences of Belarus], 2011, issue 71, pp. 196–206 (In Russian).

19. Moshnikov S. A., Ananiev V. A. Stock of wood detritus in pine plantations of South Karelia. *Sbornik trudov SPbNIILH* [Proceedings of SPFRI], 2013, no. 2, pp. 22–28 (In Russian).

Информация об авторах

Климчик Геннадий Яковлевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесоводства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: les@belstu.by

Бельчина Олеся Григорьевна – магистрант кафедры лесоводства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: belchyna@belstu.by

Шиман Дмитрий Валентинович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесоводства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: les@belstu.by

Юшкевич Михаил Валентинович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесоводства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: les@belstu.by

Information about the authors

Klimchik Gennadiy Yakovlevich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Silviculture. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: les@belstu.by

Bel'chyna Olesia Grigorievna – Master's degree student, the Departament of Silviculture. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: belchyna@belstu.by

Shyman Dmitriy Valentinovich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Silviculture. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: les@belstu.by

Yushkevich Mikhail Valentinovich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Silviculture. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: les@belstu.by

Поступила 25.03.2020

УДК 630*385: 574.4: 502.4

А. Ю. Комар[1], С. С. Цярэшчанка[2]
[1]Інстытут эксперыментальнай батанікі імя В. Ф. Купрэвіча
Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі
[2]НПЦ па біярэсурсах Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі

СУЧАСНЫ СТАН ЭКАСІСТЭМАЎ ЧАСТКІ ЗАКАЗНІКА «НАЛІБОЦКІ» ПАД УЗДЗЕЯННЕМ АСУШАЛЬНАЙ МЕЛІЯРАЦЫІ

У 60-70-я гг. XX ст. значная частка лясоў заказніка «Налібоцкі» была меліярараваная. На пачатку гэта дало значны лесаводчы эфект, які выразіўся ў павышэнні агульнай прадукцыйнасці лясоў, транспартнай даступнасці ляснога фонду і г. д. З часам, з-за адсутнасці патрэбнага догляду за гідралесамеліярацыйнымі сістэмамі, пачалі праяўляцца негатыўныя наступствы, а менавіта падтапленне лясоў, у тым ліку звязанае з жыццядзейнасцю баброў.

На аснове палявых геабатанічных матэрыялаў, сабраных летам 2019 г., і звестак лесаўпарадкавання прааналізаваныя асаблівасці сучаснага стану экасістэмаў заказніка “Налібоцкі”, якія раней былі падвергнутыя асушальнай меліярацыі (Валожынскі і Стаўбцоўскі лясгасы).

Праведзены аналіз паказаў, што большасць гідралесамеліярацыйных сістэмаў прыйшлі ў заняпад і не выконваюць свае функцыі. Асушальная сетка зарасла расліннасцю, каналы збольшага заіленыя, вадацёк у іх адсутнічае. Такім чынам, праблема ўздзеяння асушальнай меліярацыі на лясныя экасістэмы застаецца актуальнай. Быў дадзены шэраг рэкамендацый па далейшым функцыянаванні асушальнай сеткі ў залежнасці ад тыпу балота, ступені парушанасці і інш.

Ключавыя словы: гідралесамеліярацыя, эфектыўнасць, падтапленне, наступствы, рэкамендацыі.

A. Yu. Komar[1], S. S. Tereshchenko[2]
[1]V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany
of the National Academy of Science of Belarus
[2]NPC of Bioresources of the National Academy of Science of Belarus

CURRENT STATE OF ECOSYSTEMS OF THE NALIBOKSKY RESERVE UNDER THE INFLUENCE OF DRAINAGE RECLAMATION

In the 60–70s of the 20th century, a significant part of the forests of the Naliboksky reserve was reclaimed. In the beginning, this gave a significant forestry effect, which was expressed in increasing the overall productivity of forests, transport accessibility of the forest Fund, etc. Over time, due to the lack of proper care for hydro-forestry systems, negative consequences began to appear, namely, flooding of forests, including those associated with the life of the beaver.

On the basis of field geobotanical materials collected in the summer of 2019 and forest management data, the features of the current state of the ecosystems of The Naliboksky reserve, which were subjected to drainage reclamation (Volozhinski and Stolbtsovsky forestry enterprises), were analyzed.

The analysis showed that most of the hydro-forestry systems have fallen into disrepair and do not perform their functions. The drainage network is overgrown with vegetation, the channels are partially silted up, and there is no water flow. Thus, the problem of the impact of drainage reclamation on forest ecosystems remains relevant. A number of recommendations were made for the further functioning of the drainage network depending on the type of swamp, the degree of disturbance, etc.

Key words: drainage of forest land, affectinate, water logging, consequences, recommendations.

Уводзіны. Асушэнне лясоў мае вялікае значэнне ў практыцы лясной гаспадаркі і аказвае велізарны ўплыў на лясныя біяцэнозы. Гэта праяўляецца ў павелічэнні класа банітэту і агульнай прадукцыйнасці лясоў. Асушэнне забалочаных лясоў цягне за сабой павелічэнне прыросту ў 4–5 разоў, што, несумненна, мае вялікі эканамічны эфект. Але часта за эканамічным эфектам узнікаюць неспрыяльныя фактары, якія маюць значны ўплыў на экасістэмы [1, 2, 3]. Стварэнне асушальнай сеткі, выпрастоўванне рэчышчаў рэк прывялі да зменаў гідралагічнага рэжыму не толькі асушаных плошчаў, але і прылеглых тэрыторый. Такі ўплыў негатыўна адлюстроўваецца на флоры і фаўне лясных экасістэм. Знікаюць рэдкія водна-балотныя ланшафты, якія маюць асаблівую каштоўнасць у лясах асабліва падахоўных прыродных тэрыторый (АППТ).

Аб'ект даследаванняў – заказнік «Налібоцкі», вялікі масіў асушаных натуральных насаджэнняў, якія больш за 40 год таму былі падвергнутыя гідралесамеліярацыі. На момант даследвання меліярацыйныя каналы зараслі балотным разнатраўем, пакрыліся сфагнавымі імхамі і страцілі функцыянальнае значэнне.

Асноўная частка. У межах праекту міжнароднай тэхнічнай дапамогі ПРААН-ГЭФ № 96096 «Устойлівае кіраванне лясамі і воднабалотнымі экасістэмамі для дасягнення шматмэтавых пераваг» праведзены аналіз стану лясных сістэмаў часткі заказніка «Налібоцкі» пад ўздзеяннем асушальнай меліярацыі. Палявыя работы праведзеныя летам 2019 г.

Методыка даследаванняў:

1) падбор аб'ектаў гідралесамеліярацыі аналізаваннем картаграфічнага матэрыялу (планы лесанасаджэнняў, касмаздымкі, OpenStreetMap-карты);

2) закладка трансектаў для апісання расліннасці, ацэнка жыццёвага стану дрэў. Для закладкі трансектаў падбіраліся найбольш буйныя і тыповыя ўчасткі. А самі трансекты закладаліся, каб ахапіць найбольшую фітацэнатычную разнастайнасць. Колькасць вызначалася плошчай самога ўчастка;

3) апісанне стану асушальнай сеткі з вымярэннем pH і мінералізацыі вады ў каналах;

4) апісанне торфу, глыбіні яго залягання;

5) тып лесу браўся ў таксацыйным апісанні выдзела, пры неабходнасці ўдакладняўся непасрэдна на выдзеле;

6) камеральная апрацоўка палявых матэрыялаў.

Апісанні зробленыя для 15 пунктаў, якія былі аднесены намі да меліяраваных лясоў (тых, дзе асушэнне праведзена ў межах лясного фонду) і меліяравана-вытворных лясоў (участкі, дзе лес з'явіўся пасля правядзення асушэння). Назву пункту давалі па назве лясніцтва, квартала і выдзела.

Меліяраваныя сасновыя насаджэнні. «*Пяршайскае, 56/15*» закладзены ў меліяраваным сасняку чарнічна-імховым (саюз *Dicrano-Pinion* Libb. 1933 парадак *Cladonio-Vaccinietalia* K. – Lund 1967 клас *Vaccinio-Piceetea* Br.-Bl. In Br.-Bl., Siss. Et Vlieger 1939 згодна з эколага-фларыстычнай класіфікацыяй Браўн-Бланке). У складзе сасняку чарнічна-імховага (10С+Е+Б) шырока прадстаўлены дыягнастычныя віды названага сінтаксісу – *Pinus sylvestris*, *Dicranum* sp., *Calluna vulgaris*, *Pleurozium schreberi*, *Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Melampyrum sylvaticum*. Дрэвастой монадамінантны – пераважае *Pinus sylvestris* (50%), у якасці дамешку – *Betula pubescens*, *Betula pendula*, *Picea abies*. Падлесак – *Corylus avellana*, *Frangula alnus*. Праектыўнае пакрыццё травяна-хмызнячковага яруса 85%, відавы склад – 11 відаў. Меліярацыя радыкальна трансфармавала экасістэму, на момант абследавання насаджэнне знаходзіцца ў пераходнай сукцэсійнай стадыі ад забалочанага да больш сухога тыпу – да сасняка імховага. Узровень грунтовых вод (УГВ) ніжэй за 1,5 м, таму прагназуецца далейшае фарміраванне сасняку імховага, а ў будучыні – павелічэнне елкі ў саставе дрэвастою і выхад яе ў першы ярус. У сярэднім для абследаванай тэрыторыі індэкс жыццёвага стану (ІЖС) дрэвастояў склаў 85,0% – лясныя насаджэнні ў сярэднім ацэньваюцца як «здаровыя з прыкметамі паслаблення».

Каналы сухія, непрацоўныя. Лясная меліярацыя выканала сваё прызначэнне, адбыўся пераход у больш сухі тып лесу (быў багуновы, стаў чарнічна-імховы).

«*Каменскае, 68/45*» закладзены ў меліяраваным сасняку папаратнікава-арляковым, які ўтварыўся пасля асушэння з сасняку балотнага тыпу ў чарнічны, у цяперашні час у сукцэсійнай стадыі да арляковага. *Pinus sylvestris* з'яўляецца дамінантам, *Picea abies* займае пазіцыі судамінанта. У дамешку прысутнічаюць *Betula pendula*, *B. Pubescens*. Састаў насаджэння – 8С1Е1Б. Адносна густы падлескавы ярус утвораны *Frangula alnus* (праектыўнае пакрыццё 35%), *Sorbus aucuparia* (праектыўнае пакрыццё 1%). У фларыстычным складзе яшчэ прысутнічае від, уласцівы алігатрофным балотам класа *Oxycocco-Sphagnetea* Br.-Bl. et TX. 1943 – *Ledum palustre*, аднак істотную долю складаюць дыягнастычныя віды барэальных лясоў класа *Vaccinio-Piceetea* Br.-Bl. in Br.-Bl., Siss. et Vlieger 1939 – *Vaccínium myrtíllus*, *Vaccinium vitis-idaea*. Немалаважнае значэнне мае трявяный ярус, дамінантам якога з'яўляецца гіграмезафітны адыдафільны злак – *Molinia caerulea*, і шырока распаўсюджана лясная папараць – *Pteridium aquilinum*. У мохавым покрыве па міжкочках яшчэ захаваліся фрагменты сфагнавага дывана з *Sphagnum cuspidatum*; на мікрапавышэннях змяняецца зялёнымі імхамі з дамінаваннем *Pleurozium schreberi* (праектыўнае пакрыццё 65%) і ўдзелам *Polytrichum commune*, *Ptilium crista castrensis* і *Dicranum polysetum*. Як следства меліярацыі, прагназуецца далейшае фарміраванне высокапрадуктыўнага насаджэння арляковага тыпу. У сярэднім для абследаванай тэрыторыі ІЖС дрэвастояў склаў 80,0% – лясныя насаджэнні ў сярэднім ацэньваюцца як «здаровыя з прыкметамі паслаблення». Каналы слаба функцыянуюць.

«*Кляцішчанскае, 83/17*» і «*Івянецкае, 33/19*» на бягучы момант – саснякі багуновыя.

Расліннасць ўяўляе сабой сукцэсійную стадыю досыць ўстойлівага варыянта супольнасцяў забалочаных лясоў (верхавое балота). У цяперашні час на балотным масіве ў большай ступені фітацэнатычная сітуацыя мае слабапарушаны характар. У сярэднім для аб'екта «Кляцішчанскае, 83/17» індэкс ЖС дрэвастояў склаў 69,2%, для аб'екта «Івянецкае, 33/19» – 66,7%; лясныя насаджэнні ў сярэднім ацэньваюцца як «пашкоджаныя». «Кляцішчанскае, 83/17» – каналы не функцыянуюць, меліярацыйная сетка абводнена, сярэдняя ступень зарастання, невялікая заіленасць. «Івянецкае, 33/19» – асушальнікі ў здавальняючым стане, запоўненыя вадой, сваю функцыю выконваюць.

Меліяраваныя ольсы. «*Івянецкае, 12/2,15*» і «*Кляцішчанскае, 27/22*» характарызуюцца невысокай парушанасцю. Растуць ва ўмовах залішняга ўвільгатнення, затаплення або падтаплення паводкавымі водамі, пераважна на глебах са слабым дрэнажом. Для экасістэмы характэрны своеасаблівы нанарэльеф, які прадстаўляе спалучэнне прыствольных павышэнняў і астатняй тэрыторыі, якая затапліваецца талымі вясновымі водамі. Насаджэнне натуральнага паходжання. Састаў насаджэння 9Влч1Б+Е. Узрост – 60 год. Банітэт – I. Адносная паўната – 0,7. У гэтых экатопах *Alnus glutinosa* характарызуецца высокай фітацэнатычнай устойлівасцю. У сярэднім для аб'екта «Кляцішчанскае, 83/17» ІЖС дрэвастояў склаў 69,2%, для аб'екта «Івянецкае, 33/19» – 66,7%, лясныя насаджэнні ў сярэднім ацэньваюцца як «пашкоджаныя». «Івянецкае, 12/2,15» – лясная меліярацыя у даліне каналізаванай ракі. Стан каналізаванага рэчышча здавальняючы. «Кляцішчанскае, 27/22» – побач канал слаба працоўны, вада ў ім ёсць. Асушальнікі зарослыя, цалкам задзірваненыя.

«*Румскае, 25/32*» закладзены ў ольсе асаковым. Насаджэнне натуральнага паходжання. Састаў насаджэння 8Влч2Б. Узрост – 40 год. Банітэт – II. Адносная паўната – 0,6. На момант абследавання гідралесамеліярацыя ўжо не аказвае значнага ўплыву, так як каналы заіленыя, цалкам запоўненыя вадой, вадацёк адсутнічае. Дадзенае насаджэнне характарызуецца мінімальнай парушанасцю. У карэнным дрэвастоі пануе *Alnus glutinosa* III банітэту з дамешкам *Betula pubescens*. Ярка выяўленыя прыствольныя павышэнні, якія дасягаюць вышыні да 1 м. У падросце *Betula pubescens*, *Picea abies*, *Alnus glutinosa*. Елка, пасяляючыся ў ольсе, мае чэзлы выгляд і па росце адносіцца да IV–V банітэту. Насаджэнні недаўгавечныя: зрэджванне пачынаецца пасля 50 гадоў, а пасля 80 гадоў маладняк атрымлівае пераважнае значэнне. Прагназуемая далейшая дынаміка – пераход у тып асакова-вярбовых балот. У сярэднім для аб'екта «Румскае, 25/32» ІЖС дрэвастояў склаў 64,9% – лясныя насаджэнні ў сярэднім ацэньваюцца як «пашкоджаныя». Каналы заіленыя і запоўненыя вадой, вадацёк адсутнічае. Трубапераезды заілены, у непрацоўным стане. Для захавання лясной экасістэмы неабходная рэканструкцыя і аднаўленне меліярацыйнай сеткі.

Меліяравана-вытворныя лясы. «*Налібокскае, 54/14*» і «*Румскае, 41/8*» уяўляюць сабой пераважна лясную экасістэму, меліяраванавытворны сасняк чарнічны, бліжэй да імховага тыпу. Састаў насаджэння для аб'екта «Налібокскае, 54/14» 10С. Узрост – 40 год. Банітэт – II. Адносная паўната – 0,6. Дрэвастой сфармаваны ў асноўным *Pinus sylvestris* (праектыўнае пакрыццё 50–68%), ўзрост – 40 гадоў, банітэт – II. Уздоўж каналаў фармуюцца палосы з падростам *Picea abies* (праектыўнае пакрыццё 1–2%), *Betula pendula* (праектыўнае пакрыццё 1–3%) і *Betula pubescens* (праектыўнае пакрыццё 2–3%). У сярэднім для ПП «Налібоцкае, 54/14» і ПП «Румскае, 41/8» ІЖС дрэвастояў склаў 69,7 і 73,5% – лясныя насаджэнні ў сярэднім ацэньваюцца як «аслабленыя». Меліярацыйная сетка зарослая. У каналах вада адсутнічае, УГВ ніжэй за 0,5 м, таму прагназуецца далейшае фарміраванне сасняку чарнічнага.

«*Івянецкае, 8/24*» прадстаўлены лясной экасістэмай з меліяравана-вытворным бярэзнікам асаковым, які расце на ўскраіне сасняку багуновага. Састаў насаджэння – 7Б3С. Узрост – 30 год. Банітэт – III. Адносная паўната – 0,7. Рэжым увільгатнення на працягу вегетацыйнага сезону нестабільны, у летні перыяд узровень балотных вод апускаецца ніжэй за 1,0 м, верхні пласт торфу падсушваецца. Наглебавае покрыва сфармавана густым травастоем з дамінаваннем *Molinia caerulea*. У мохава-лішайнікавым ярусе ў роўнай ступені прадстаўлены сфагнавыя і зялёныя імхі. ІЖС дрэвастояў склаў 74,4% – лясное насаджэнне ацэньваецца як аслабленае. Асушальнікі зараслі, не функцыянуюць.

«*Румскае, 21/38*» і «*Румскае, 68/62*» закладзены ў меліярацыйна-вытворных пушыстаберазняках папаратнікавага тыпу, аднак характарызуюцца рознай сітуацыяй. Фларыстычны склад участка «Румскае 21/38» адпавядае насаджэнням дадзенага тыпу – 10Б+Влч. Узрост – 50 год. Банітэт – I. Адносная паўната – 0,6. Аднак з-за ранніх вясновых павадкаў дрэвастой растроены, аслаблены. Пры дадзеных умовах будзе фарміравацца адкрытае балота з хмызнякамі. Неабходная рэканструкцыя гідралесамеліярацыйнай (ГЛМ) сеткі. Індэкс ЖС

дрэвастояў склаў 52,4% – лясныя насаджэнні ў сярэднім ацэньваюцца як «пашкоджаныя». Гідралесамеліярацыйная сетка не функцыянуе, каналы заіленыя. На ўчастку «Румскае, 68/62» дрэвастой развіваецца на раней адкрытым балоце, па характары вырастання і фларыстычнага комплексу займае прамежкавае становішча, пераходзячы ў больш сухі тып лесу – чарнічны. Састаў насаджэння – 9Б1Влч. Узрост – 35 год. Банітэт – II. Адносная паўната – 0,6. Індэкс ЖС дрэвастояў склаў 70,9% – лясныя насаджэнні ацэньваюцца як «аслабленыя». Каналы запоўненыя вадой і заіленыя, рэгуляванне вады адсутнічае.

На аб'екце «*Прудское, 1/4*» ідзе фарміраванне пушыстабярозавага насаджэння даўгамошнага тыпу. Састаў насаджэння – 9Бп1Е+Ас. Узрост – 45 год. Банітэт – III. Адносная паўната – 0,6. У саставе падросту прысутнічаюць *Betula pubescens*, *Picea abies* і *Quercus robur*, іх стан здавальняючы. *Picea abies* (праектыўнае пакрыццё да 25%) утварае другі ярус. Травяна-хмызнячковы ярус разрэджаны, малавідавы. Добра развітае мохавае покрыва (праектыўнае пакрыццё да 80%), утворанае зялёнымі імхамі з дамінаваннем *Polytrichum commune* (праектыўнае пакрыццё 20%). ІЖС дрэвастояў склаў 76,8% – лясныя насаджэнні ў сярэднім ацэньваюцца як аслабленыя. Меліярацыйныя каналы ў непрацоўным стане, зарослыя, іх роля цяпер малазначная.

«*Кляцішчанскае, 6/41*» закладзены ў пушыстаберазняку балотна-папаратнікавым. Гэта карэнны тып драбналістых вільготных лясоў, якія растуць ва ўмовах перыядычнага затаплення або падтаплення паводкавымі водамі. Насаджэнне натуральнага паходжання. Састаў насаджэння – 7Б3Влч+Е. Узрост – 40 год. Банітэт – III. Адносная паўната – 0,6. Насаджэнне слаба парушанае, ГЛМ сетка аказала нязначны ўплыў, трансфармаваўшы асаковы тып лесу ў балотна-папаратнікавы. У сярэднім для аб'екта «Кляцішчанскае, 6/41» індэкс ЖС дрэвастояў склаў 67,1% – лясныя насаджэнні ў сярэднім ацэньваюцца як «пашкоджаныя». Меліярацыйная сетка не працуе, хоць канальная сетка развітая, зарослая, не заіленая, напаўняецца вадой у вясновы перыяд.

«*Налібоцкае, 9/21*» закладзены ў балотным меліяравана-вытворным пушыстаберазняку асаковым. Бярэзнік знаходзіцца ва ўмовах перыядычнага затаплення з наступным значным дрэнажом. Насаджэнне натуральнага паходжання, слабапарушанае, аддаленае ад населеных пунктаў, цяжкадаступнае, у сувязі з чым мае блізкае да натуральнага аблічча. У драўняным ярусе пануе магутная *Betula pubescens*, вышынёй да 12–18 м, з дамешкам алешыны і елкі. Састаў насаджэння – 8Бп2Влч. Узрост насаджэння – 40 год. Банітэт – IV. Адносная паўната – 0,5. У натуральным аднаўленні – *Betula pubescens*, *Alnus glutinosa*, *Picea abies*. Густы падлесак (праектыўнае пакрыццё 35%) складаецца з *Salix cinerea*, *Frangula alnus* (як следства ўплыву меліярацыі). У травяным ярусе гіграмезафітнае буйнатраўе: *Filipendula ulmaria*, *Phragmites australis*, качкарныя асакі, што і ў альшаніках (*Carex caespitosa* і *C. appropinquata*). Мохавае покрыва прыгнечанае: *Climacium dendroides* і *Pleurozium schreberi* сустракаюцца толькі зрэдку на асаковых купінах. Насаджэнне натуральнага паходжання, слабапарушанае, аддаленае ад населеных пунктаў, цяжкадаступнае, у сувязі з чым мае блізкі да натуральнага аблічча. У сярэднім для аб'екта «Налібоцкае, 9/21» ІЖС дрэвастояў склаў 66,9% – лясныя насаджэнні ў сярэднім ацэньваюцца як «пашкоджаныя». Меліярацыйная сетка моцна зарослая, УГВ 0,1–0,2 м. Канал напаўняецца ў ранневясновы перыяд.

Заключэнне. Праведзены аналіз паказаў, што ў сярэднім для абследаванай тэрыторыі ІЖС меліяраваных сасновых насаджэнняў склаў 74,62% – лясныя насаджэнні ацэньваюцца як «аслабленыя». ІЖС меліяравана-вытворных саснякоў – 71,43% і таксама ацэньваюцца як «аслабленыя». У сярэднім для абследаванай тэрыторыі ІЖС меліяраваных ольсаў склаў 76,72% – лясныя насаджэнні ў сярэднім ацэньваюцца як «аслабленыя». У сярэднім для абследаваных тэрыторый ІЖС меліяравана-вытворных пушыстаберазнякоў склаў 65,56% – лясныя насаджэнні ў сярэднім ацэньваюцца як «пашкоджаныя».

Практычна на ўсіх пунктах гідралесамеліярацыйная сетка не функцыянуе, каналы зараслі (зарастанне больш за 50%), моцна заіленыя (заіленне больш за 1 м).

Адзначаюцца ўчасткі падтаплення бабрамі. Чакаецца далейшае падтапленне тэрыторый і выпадзенне драўняных пародаў.

Па выніках даследавання былі дадзеныя наступныя рэкамендацыі:

1) на тэрыторыях, дзе ГЛМ сетка выканала сваё прызначэнне – пакінуць без зменаў. Гэта ў асноўным багністыя ўчасткі з высокім узроўнем вады, альбо ўчасткі, якія ўяўляюць сабой значна прасунутую стадыю аднаўленчай сукцэсіі (на ўзроўні сфармавалася хмызняковая і лясная расліннасць), альбо ўчасткі з прадуктыўнымі дрэвастоямі (у выніку асушэння назіралася павелічэнне прыросту растучых дрэвастояў, традыцыйнае лесакарыстанне тут будзе эфектыўным). На момант правядзення даследаванняў некаторыя аб'екты з'яўляюцца

забалочанымі, у першую чаргу з-за зарастання або перакрыцця каналаў, і мяняць гідралагічны рэжым на іх немэтазгодна;

2) у месцах, дзе ідзе натуральнае фарміраванне балотаў, – падтрымка УГВ і аднаўленне тыповага для воднага рэжыму балот, раслінага покрыва і працэсу торфаўтварэння. Як правіла, гэта ўчасткі асушаных верхавых балот і ўчасткі з высокай пажарнай небяспекай;

3) у месцах, дзе назіраюцца лішкавыя воды, – рэканструкцыя ГЛМ сеткі;

4) у месцах падтаплення бабрамі – кантроль колькасці баброў, разбурэнне плацінаў.

Спіс літаратуры

1. Вомперский С. Е. Биологические основы эффективности лесоосушения. М.: Наука, 1964. 314 с.

2. Маслов Б. С., Минаев И. В. Мелиорация и охрана природы. М.: Россельхозиздат, 1985. 271 с.

3. Якимов Н. И. Состояние и проблемы мелиорации лесов Республики Беларусь // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы конференции. Минск: БГТУ, 2014. С. 13–15.

4. Ипатьев В. А., Крук Н. К., Шараг Е. И. Гидролесомелиорация: состояние и тенденции развития, методология научных исследований. Гомель: Ин-т леса НАН Беларуси, 2003. 32 с.

References

1. Vomperskiy S. E. *Biologicheskie osnovy effektivnosti lesoosusheniya* [Biological bases of forest drainage efficiency]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 314 p.

2. Maslov B. S., Minaev I. V. *Melioratsiya i okhrana prirody* [Land reclamation and nature protection]. Moscow, Rossel'khozizdat Publ., 1985. 271 p.

3. Yakimov N. I. Problems of forest complex development. *Aktual'nyye problem razvitiya lesnogo kompleksa: materialy konferentssii* [Current problems of forest development: conference materials], 2014, pp. 13–15 (In Russian).

4. Ipat'ev V. A., Kruk N. K., Sharag E. I. *Gidrolesomelioratsiya: sostoyanie i tendentsii razvitiya, metodologiya nauchnyh issledovaniy* [Hydro-forestry: state and development trends, research methodology]. Gomel, In-t lesa NAN Belarusi Publ., 2003. 32 p.

Інфармацыя пра аўтараў

Комар Артур Юр'евіч – аспірант, малодшы навуковы супрацоўнік сектара маніторынгу раслінага свету. Інстытут эксперыментальнай батанікі імя В. Ф. Купрэвіча Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі (220072, г. Мінск, вул. Акадэмічная, 27, Рэспубліка Беларусь). E-mail: artur.komar@tut.by.

Цярэшчанка Святлана Сяргееўна – старшы навуковы супрацоўнік сектара экалагічнай ацэнкі пераўтварэнняў навакольнага асяроддзя. НПЦ па біярэсурсах Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі (220072, г. Мінск, вул. Акадэмічная, 27, Рэспубліка Беларусь). E-mail: aleks-t@tut.by.

Information about the author

Komar Artur Yur'evich – PhD student, Junior Researcher, the Sector of Monitoring of Plant World. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademichnaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: artur.komar@tut.by.

Tereshchenko Svetlana Sergeevna – Senior Researcher, the Sector for Environmental Assessment of Environmental Transformations. NPC of Bioresources of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademichnaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: aleks-t@tut.by.

Паступіў 18.03.2020

УДК 630*114:582.475:630*243(476.7)

М. В. Левковская[1], В. В. Сарнацкий[2]
[1]Брестский государственный университет им. А. С. Пушкина
[2]Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича
Национальной академии наук Беларуси

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ РУБОК УХОДА НА КОРНЕНАСЫЩЕННОСТЬ ПОЧВЫ СОСНЯКОВ МШИСТЫХ

В статье проанализированы результаты трехлетних исследований биомассы корней верхних горизонтов почвы методом мелких монолитов в чистых сосняках мшистых Брестского государственного производственного лесохозяйственного объединения, в которых были проведены прореживания и проходные рубки с использованием лесозаготовительных многооперационных машин и механизмов: харвестеров и форвардеров. С целью изучения динамики корненасыщенности на 8 пробных площадях в сосняках Барановичского, Ивацевичского и Пружанского лесхозов были отобраны почвенные монолиты высотой 20 см, где содержится до 80% крупных и мелких активных корней сосны. Определена общая масса корней и их отдельных фракций по толщине на пасеках и волоках по сравнению с контрольным участком без ухода. Изменение показателей твердости и плотности почвы после движения харвестеров и форвардеров влияет на массу корней различных фракций. Величина сухой массы тонких и крупных корней в пасеке в большинстве случаев превышает их массу на волоке.

Достоверно отличаются значения массы корней лесной подстилки на единицу площади пасеки и волока. Масса физиологически активных корней лесной подстилки после прохождения многооперационных машин уменьшилась в 1,2–3,9 раза.

Ключевые слова: механизированные рубки ухода, сосняки мшистые, твердость почвы, масса корней.

M. V. Levkovskaya[1], V. V. Sarnatsky[2]
[1]Brest State A. S. Pushkin University
[2] V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany
of the National Academy of Sciences of Belarus

INFLUENCE OF MECHANIZED THINNING ON ROOT MASS IN MOSS-COVERED PINE FORESTS

The article presents the results of three-year investigation of the dynamic of the root mass of the upper soil horizons by the method of small monoliths in the pure moss-covered pine forests in Brest state forestry production association, where thinning was carried out by harvesters and forwarders. In order to study the dynamics of root mass in 8 trial areas in the pine forests of Baranovichy, Ivatsevichy and Pruzhany forestries, there were selected soil monoliths 20 cm deep, which contain up to 80% of large and small physiologically active pine roots. There were determined the total mass of roots and their individual fractions for the thickness in the blocks and the corridors in comparison with the control plot without care. The change in the hardness and density of the soil after the movement of harvesters and forwarders affects the mass of the roots of various fractions. The amount of dry mass of fine and large roots in the blocks is larger generally than it's mass for the corridors.

The mass of the physiologically active roots of the forest floor decreased 1.2–3.9 times after being passed by multi-operation machines.

Key words: mechanized thinning, moss-covered pine forests, soil hardness, root mass.

Введение. В связи с повышением уровня механизации лесозаготовок при проведении прореживаний и проходных рубок актуальным является изучение изменений компонентов лесных экосистем под влиянием многооперационных машин и механизмов.

Согласно многим исследованиям, применение агрегатной лесозаготовительной техники приводит к уплотнению почвы, изменению водно-физических свойств, условий корнеобитания и нарушению функционирования корневых систем растений [1–8]. Механическое повреждение поверхностных корневых систем приводит к снижению роста деревьев из-за повреждаемости мелких корней [6].

По данным Баневой Н. А., после проведения механизированных рубок ухода масса физиологически активных корней в почве волоков уменьшается на 80–90% [1]. Нормальная реакция на рубки ухода наблюдается у деревьев,

расположенных не ближе 3–5 м от колесной колеи [2].

Характер воздействия лесозаготовительной техники на почву и лесную среду зависит от зонально-типологических особенностей, почвенно-грунтовых условий, времени года, типа применяемых механизмов и технологических процессов лесосечных работ [4, 6, 9].

С этой целью для каждого региона разрабатывается классификация лесных территорий с указанием сезона и технологии проведения рубок, что способствует минимизированию воздействия техники на почву и разнообразие растительности [6, 10].

На территории лесхозов Брестской области используют следующие харвестеры для рубок ухода: Vimek-404, Sampoo-1046, Амкодор-2541.

Основная часть. Цель работы – определить особенности изменения массы корней в сосняках мшистых лесхозов Брестского государственного производственного лесохозяйственного объединения после рубок ухода слабой и умеренной интенсивности с использованием харвестеров и форвардеров (Valtra X120, Vimek 606, МПТ 461.1).

В чистых сосняках мшистых I класса бонитета, II–III классов возраста, состава 10С или 10С+Б Брестской области на 8 пробных площадях 3 года для изучения изменения массы корней отбирали по 3 почвенных монолита размером 10×10×20 см на волоках и пасеках.

Следует отметить, что рубки ухода на пробных площадях 2, 3 были проведены в зимне-весенний период, а на пробной площади 6 – зимой при наличии снежного покрова.

Выбор параметра высоты монолита обусловлен тем, что в Полесье основная масса крупных и мелких (тонких) активных корней сосны в чистых и смешанных насаждениях сосредоточена в верхнем 20-сантиметровом слое почвы (в перегнойном горизонте A_1) [11, 12], где в наибольшей степени ощущается колебание температуры и влажности почвы после разреживания древостоя [13].

Выбранные из монолитов по слоям корни согласно методике И. Н. Рахтеенко – Б. И. Якушева разделяли на три группы по диаметру (меньше 1 мм, 1–3 мм и толще 3 мм). Корни тоньше 1 мм относили к тонким (мелким), двух других фракций – к крупным [14].

Корни высушивали до воздушно-сухого состояния при температуре 105° в термостате и вычисляли их массу на единицу площади [14].

Следует отметить, что существуют различные подходы к выделению фракций корней в зависимости от морфологии и выполняемых функций [11, 12, 14–18].

Физиологически активная часть корневой системы представлена ростовыми и сосущими корневыми окончаниями. Толщина ростовых корней древесных растений составляет 1–3 мм, иногда – 3–8 мм. Они крупнее сосущих, обладают интенсивным ростом и наряду с поглотительной функцией осваивают новые области почвогрунта.

Тонкая фракция корней функционально специфична, поэтому выделяют тонкие и скелетные (проводящие) корни. Многие исследователи к тонким корням относят фракцию с толщиной меньше 1 мм, так как они подвергаются сезонным флуктуациям массы [17].

Наиболее важной считается фракция корней диаметром до 3 мм (по ряду данных до 2 мм), к которым относят активные корни до 1 мм толщины (всасывающие) и проводящие толще 1 мм [12, 14, 16]. Большинство исследователей к деятельным корням относят корни тоньше 0,5–1–2 мм, но это деление условно. По В. А. Колесникову, на примере плодовых культур целесообразнее выделять фракцию тонких корней диаметром до 2–3 мм [12, 14–16].

Орлов А. Я., Кошельков С. П. корни сосны по морфолого-анатомическому строению, связанному с их основной функциональной ролью, делили на две категории – проводящие и сосущие (всасывающие) [11], другие исследователи выделяли фракции физиологически активных корней диаметром до 2 мм и проводящих диаметром более 2 мм [18].

Согласно результатам проведенных исследований плотность верхних горизонтов почвы (50 см) в пасеке на пробных площадях, заложенных в сосняках мшистых Брестской области, варьирует от 0,91 до 1,42 г/см^3. На волоке после проведения рубок ухода различной давности с применением лесозаготовительной техники показатель плотности увеличивается в 1,1–1,4 раза по сравнению с пасекой и контрольным вариантом опыта и достигает 1,53 г/см^3.

Быстрота роста и накопления массы древесными растениями максимальна при плотности почвы 1,1–1,3 г/см^3, рост корней сосны отмечен при плотности почвы менее 1,6 г/см^3 [19].

Результаты полевых исследований позволяют отметить возрастание твердости почвы на волоках до 17 кг/см^2, что в 1,7–3,5 раза превышает показатели твердости на пасеке и в 1,3–4,0 раза в контрольном варианте без ухода.

Изменение показателей твердости и плотности почвы на волоках после движения харвестеров и форвардеров может повлиять на массу и развитие тонких корней на волоках [1, 5].

По результатам анализа отобранных почвенных монолитов общая масса корней диаметром

до 3 мм на волоке составила 3,99 т/га, пасеке – 5,03 т/га, контрольном участке без ухода – 2,85 т/га (табл. 1).

Таблица 1

Общая масса корней разных фракций (до 3 мм), т/га

ПП	Давность рубки, лет	Масса корней, т/га	
		Коридор	Пасека
1	7	1,19	1,53
	9	2,14	5,61
2	7	4,44	6,45
	8	8,06	11,03
3	6	3,86	4,15
	8	4,29	6,84
4	4	2,28	1,96
	6	3,77	5,4
5	2	4,81	5,19
	4	4,82	7,13
6	2	3,37	3,36
	3	5,16	4,74
7	1	3,67	3,41
	2	3,93	3,63
8	Без ухода	1,5	
	Без ухода	4,2	

Масса корней верхних горизонтов почвы диаметром до 3 мм на исследуемых пробных площадях в пасеке варьирует от 1,53 до 11,03 т/га; на волоке – от 1,19 до 8,06 т/га. Общая масса фракции корней толщиной до 3 мм в 1,1–3,3 раза больше в пасеке, чем на волоке.

Различия в значениях массы корней в зависимости от давности рубки на волоке и пасеке достоверны, что связано с уменьшением количества деревьев на волоке и отмиранием корней. Через 1–2 года после рубки общая масса корней различных фракций диаметром до 3 мм на пасеке и волоке (пробные площади 6, 7) в верхнем 20-сантиметровом слое почвы отличается незначительно.

Масса тонких корней толщиной менее 1 мм на волоке в среднем составляет 1,98 т/га, на пасеке – 3,0 т/га. Насыщенность почвы фракцией мелких корней составляет от 25 до 65% общей массы корней на волоке. Развитие фракции тонких корней достигает 75–93% на пасеке в сосняках мшистых через 7–9 лет после проведения рубки с использованием многооперационных машин.

В ходе исследований определяли массу корней различных фракций по почвенным горизонтам (табл. 2). При анализе почвенных монолитов, отобранных через 1–2 года после проведения рубки с использованием лесозаготовительной техники (пробные площади 6, 7), выявлены небольшие различия в корненасыщенности пасеки и волока подстилки и гумусового горизонта. Достоверны различия значений массы корней лесной подстилки на единицу площади пасеки и волока. В большинстве случаев масса корней лесной подстилки уменьшалась в 1,2–3,9 раза по сравнению с пасекой и контролем.

По результатам исследований Карпечко А. Ю., разреживание полога над технологическим коридором сопровождается микроклиматическими изменениями, что может приводить к миграции корней в нижележащие почвенные горизонты [5].

Таблица 2

Изменение массы корней верхних горизонтов почвы после рубок ухода

ПП	Давность рубки, лет	Горизонт	Масса корней диаметром до 3 мм, т/га	
			Коридор	Пасека
1	7	A_0	0,40 ± 0,01	0,73 ± 0,02
		A_1	0,79 ± 0,03	0,8 ± 0,02
	9	A_0	0,41 ± 0,02	3,20 ± 0,15
		A_1	1,73 ± 0,03	2,41 ± 0,1
2	7	A_0	1,77 ± 0,07	3 ± 0,11
		A_1	2,67 ± 0,13	3,45 ± 0,17
	8	A_0	2,02 ± 0,1	1,66 ± 0,1
		A_1	6,04 ± 0,1	9,37± 0,26
3	6	A_0	1,14 ± 0,05	1,99 ± 0,08
		A_1	2,72± 0,26	2,16 ± 0,11
	8	A_0	1,78 ± 0,05	2,31 ± 0,11
		A_1	2,51 ± 0,12	4,53 ± 0,23
4	4	A_0	0,32 ± 0,02	0,69 ± 0,04
		A_1	1,96 ± 0,1	1,27 ± 0,06
	6	A_0	1,28 ± 0,06	1,51 ± 0,08
		A_1	2,49 ± 0,16	3,89 ± 0,22
5	2	A_0	0,56 ± 0,03	3,56 ± 0,17
		A_1	4,25± 0,21	1,63 ± 0,1
	4	A_0	1,58 ± 0,08	1,93 ± 0,1
		A_1	3,24 ± 0,2	5,2 ± 0,26
6	2	A_0	0,9 ± 0,05	1,26 ± 0,06
		A_1	2,47 ± 0,12	2,10 ± 0,11
	3	A_0	1,35 ± 0,07	1,85 ± 0,09
		A_1	3,81 ± 0,2	2,89 ± 0,14
7	1	A_0	0,66 ± 0,03	0,77 ± 0,04
		A_1	3,01 ± 0,15	2,64 ± 0,13
	2	A_0	1,35 ± 0,06	1,19 ± 0,05
		A_1	2,58± 0,12	2,44 ± 0,12
8	Контроль	A_0	0,71 ± 0,04	
		A_1	0,79 ± 0,04	
	Контроль	A_0	1,3 ± 0,06	
		A_1	2,9 ± 0,15	

Массовая доля корней диаметром до 3 мм в гумусовом горизонте составляет 31–82% от общей массы корней исследуемых фракций во всех точках отбора (пасека, коридор, контроль).

Заключение. Изменение плотности и твердости почвы после проведения рубок ухода с использованием харвестеров и форвардеров

влияет на массу корней различных фракций на волоках и пасеках в зависимости от давности рубки и давления, оказываемого машинами на почву. Величина сухой массы тонких и более крупных корней в пасеке в большинстве случаев превышает их массу на волоке. Общая масса фракций корней толщиной до 3 мм в 1,1–3,3 раза больше в пасеке, чем на волоке.

Изменение корненасыщенности верхних горизонтов почвы в наименьшей мере происходит при проведении рубок ухода в зимний период с характерными для этой поры морозами.

Список литературы

1. Банева Н. А. Влияние проходных рубок на массу корней деревьев в почве волоков // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение. 1990. С. 38–40.

2. Вестерлюнд И. Механические повреждения корней и почвы // Лесное хозяйство. 1988. № 6. С. 55–56.

3. Ермичев В. А., Лобанов В. Н., Кривченкова Г. Н., Артемов А. В. Прогнозирование осадки и плотности лесной почвы после прохода гусеничных машин // Лесной журнал. 2006. № 2. С. 49–52.

4. Кайрюкштис Л., Шакунас З. Воздействие лесных машин на почву // Лесное хозяйство. 1990. № 8. С. 37–40.

5. Карпечко А. Ю. Изменение плотности и корненасыщенности почв под влиянием лесозаготовительной техники в еловых лесах Южной Карелии // Лесоведение. 2008. № 5. С. 66–70.

6. Климчик Г. Я., Симанович В. А., Бахур О. В. Трансформация почв сосняков в связи с использованием различных машин и механизмов // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2008. Вып. XVI. С. 160–163.

7. Федоренчик А. С. Экологические особенности проектирования и использования лесной техники // Актуальные вопросы стратегии развития лесного хозяйства Беларуси: материалы Респ. науч.-практ. семинара; пос. Ждановичи, Минский р-н, 10 апр. 2012 г. / М-во лес. хоз-ва Респ. Беларусь, Респ. центр повышения квалификации рук. работников и специалистов лес. хоз-ва. Минск: В.И.З.А. ГРУПП, 2012. С. 79–87.

8. Федоренчик А. С., Протас П. А. Повреждение корней деревьев движителями лесозаготовительных машин при проведении несплошных рубок леса // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2005. Вып. XIII. С. 26–27.

9. Побединский А. В. Лесоводственно-экологическая оценка влияния лесозаготовительной техники на почвенно-растительный покров // Лесное хозяйство. 1995. № 3. С. 30–33.

10. Климчик Г. Я., Соколовский И. В. Трансформация и восстановление почвы сосняков, пройденных рубками // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2007. Вып. XV. С. 108–112.

11. Орлов А. Я., Кошельков С. П. Почвенная экология сосны. М.: Наука, 1971. 323 с.

12. Рахтеенко И. Н. Рост и взаимодействие корневых систем древесных растений. Минск: Издательство АН БССР, 1963. 253 с.

13. Банева Н. А. Восстановление массы корней ели после рубок ухода // Лесоведение. 1986. № 3. С. 62–66.

14. Рахтеенко И. Н., Якушев Б. И. Комплексный метод исследования корневых систем растений // Ботаника (исследования). Вып. XII. Минск, 1970. С. 108–116.

15. Колесников В. А. Методы изучения корневой системы древесных растений. М.: Лесная промышленность, 1971. 152 с.

16. Красильников П. К. Методика полевого изучения подземных частей растений (с учетом специфики ресурсоведческих исследований). Л.: Наука, 1983. 208 с.

17. Усольцев В. А., Залесов С. В. Методы определения биологической продуктивности насаждений. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2005. 147 с.

18. Шлапак В. П. Фитомасса корней в культурах сосны в свежих суборях и дубравах // Лесной журнал. 2007. № 6. С. 49–53.

19. Домасевич А. А. Закономерности пространственного распределения корневых систем древесных растений в лесных культурах, на бывших сельскохозяйственных землях, созданных при различных способах обработки почвы // Труды БГТУ. 2012. № 1 (148): Лесное хоз-во. С. 165–167.

References

1. Baneva N. A. The effect of thinning on the root mass of trees in the soil of the corridors. *Lesovodstvo, lesnye kul'tury i pochvovedenie* [Forestry, forest cultures and soil science], 1990, pp. 38–40 (In Russian).

2. Vesterlyund I. Mechanical damage to roots and soil. *Lesnoe khozyaystvo* [Forestry], 1988, no. 6, pp. 55–56 (In Russian).

3. Ermichev V. A., Lobanov V. N., Krivchenkova G. N., Artemov A. V. Forecasting the draft and density of forest soil after the passage of tracked machines. *Lesnoy zhurnal* [Forest journal], 2006, no. 2, pp. 49–52 (In Russian).

4. Kayryukshtis L., Shakunas Z. Impact of forestry machines on the soil. *Lesnoe khozyaystvo* [Forestry], 1990, no. 8, pp. 37–40 (In Russian).

5. Karpechko A. Yu. Changes in density and root mass in soils under the influence of harvesting machines in spruce forest of southern Karelia. *Lesovedenie* [Forest science], 2008, no. 5, pp. 66–70 (In Russian).

6. Klimchik G. Ya., Simanovich V. A., Bakhur O. V. Transformation of soils of pine due of using of various logging technical equipment and mechanisms. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series I, Forestry, 2008, issue XVI, pp. 160–163 (In Russian).

7. Fedorenchik A. S. Ecological features of the design and use of forest machinery. *Aktual'nye voprosy strategii razvitiya lesnogo khozyaystva Belarusi: materialy Resp. nauch.-prakt. seminara* [Topical issues of forestry development strategy of Belarus: materials of Republical scientific and practical workshop]. Minsk, 2012, pp. 79–87 (In Russian).

8. Fedorenchik A. S., Protas P. A. Damage rate of the tree roots by forestry machines when carrying out incomplete felling. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series I, Forestry, 2005, issue XIII, pp. 26–27 (In Russian).

9. Pobedinskiy A. V. Forestry-ecological assessment of the impact of forestry equipment on soil and living ground cover. *Lesnoe hozyaystvo* [Forestry], 1995, no. 3, pp. 30–33 (In Russian).

10. Klimchik G. Ya., Sokolovskiy I. V. Transformation and restoration of soils of pine after cuttings. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series I, Forestry, 2007, issue XV, pp. 108–112 (In Russian).

11. Orlov A. Ya., Koshel'kov S. P. *Pochvennaya ekologiya sosny* [Soil ecology of pine]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 323 p.

12. Rahteenko I. N. *Rost i vzaimodeystvie kornevykh sistem drevesnykh rasteniy* [Growth and interaction of the root systems of woody plants]. Minsk, AN BSSR Publ., 1963. 253 p.

13. Baneva N. A. Recovery of root mass of spruce after thinning. *Lesovedenie* [Forest science], 1986, no. 3, pp. 62–66 (In Russian).

14. Rakhteenko I. N., Yakushev B. I. Complex method of research of root systems of plants. *Botanika (issledovaniya)* [Botany (research)], issue 12, Minsk, 1970, pp. 108–116 (In Russian).

15. Kolesnikov V. A. *Metody izucheniya kornevoy sistemy drevesnykh rasteniy* [Methods for studying the root system of woody plants]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1971. 152 p.

16. Krasil'nikov P. K. *Metodika polevogo izucheniya podzemnykh chastey rasteniy (s uchetom spetsifiki resursovedcheskikh issledovaniy)*. [The technique of field study of underground plant parts (specific to resourse research)]. Leningrad, Nauka Publ., 1983. 208 p.

17. Usol'tsev V. A., Zalesov S. V. *Metody opredeleniya biologicheskoy produktivnosti nasazhdeniy* [Methods for determining biological productivity of planting]. Ekaterinburg, Ural. gos. lesotekhn. un-t Publ., 2005. 147 p.

18. Shlapak V. P. Roots phytomass in pine cultures in new subors and oak forests. *Lesnoy zhurnal* [Forest journal], 2007, no. 6, pp. 49–53 (In Russian).

19. Domasevich A. A. Regularities of spatial distribution of the root systems of woody plants in forest cultures, on former agricultural lands created by various methods of soil cultivation. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 1 (148): Forestry, pp. 165–167 (In Russian).

Информация об авторах

Левковская Марина Викторовна – старший преподаватель кафедры ботаники и экологии. Брестский государственный университет им. А. С. Пушкина (224016, г. Брест, б-р Космонавтов, 21, Республика Беларусь). E-mail: lemarivik@mail.ru

Сарнацкий Владимир Валентинович – доктор биологических наук, главный научный сотрудник. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 27, Республика Беларусь). E-mail: sarnatsky1@tut.by

Information about the authors

Levkovskaya Marina Victorovna – Senior Lecturer, the Department of Botany and Ecology. Brest State A. S. Pushkin University (21, Kosmonavtov blvd, 224016, Brest, Republic of Belarus). E-mail: lemarivik@mail.ru

Sarnatsky Vladimir Valentinovich – DSc (Biology), Chief Researcher. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sarnatsky1@tut.by

Поступила 02.04.2020

УДК 630.174:630*524

А. О. Луферов
РДЛУП «Гомельлеспроект»

СОСТОЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ВОЗОБНОВЛЕНИЯ СОСНОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ БЕЛАРУСИ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОЙ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В статье приведены результаты анализа экспериментального материала и статистической информации для выявления лесоводственной эффективности мероприятий по содействию естественному возобновлению сосновых насаждений Беларуси. Проанализирован отечественный и зарубежный опыт, выявлены особенности и факторы, влияющие на ход естественного возобновления сосны обыкновенной. Исследование хода естественного возобновления леса проводилось на территории 16 лесохозяйственных учреждений Беларуси с учетом типов лесорастительных условий и условий местопроизрастания. Для выявления характеристики подроста под пологом приспевающих, спелых и перестойных сосновых насаждений использовались актуальные лесоустроительные базы данных. Обнаружены негативные тенденции формирования соснового подроста под пологом насаждений. На непокрытых лесом землях лесообсеменительный потенциал сохраняется на расстоянии до 30–35 м от семенных деревьев или стены леса. Обнаружено отсутствие прямой зависимости густоты и встречаемости особей сосны от площади участка лесовосстановления, большее влияние оказывает интенсивность травяно-кустарничкового яруса. Экспериментально доказано, что совпадение времени проведения минерализации почвы со временем семеношения семенных деревьев оказывает влияние на ход образования молодого поколения сосны, однако не является единственным фактором, влияющим на успешность хода естественного возобновления леса.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, естественное возобновление леса, вырубка, прогалина, семенное дерево, насаждение.

A. O. Luferov
RSFUE “Gomellesproekt”

STATE OF NATURAL REGENERATION OF PINE STANDS OF BELARUS UNDER CONDITIONS OF MODERN ECONOMIC ACTIVITY

The article presents the results of the analysis of experimental material and statistical information to identify the forestry effectiveness of measures to promote the natural regeneration of pine stands in Belarus. The local and foreign experience has been analyzed, features and factors affecting the course of natural regeneration of Scots pine have been identified. The study of the course of pine natural regeneration was conducted on the territory of 16 forest enterprises in Belarus, taking into account the types of forest and habitat conditions. To identify the characteristics of the undergrowth under the canopy of pre-mature, mature and over-mature pine stands, actual forest inventory databases were used. Negative trends in the formation of pine undergrowth under the canopy of forest stands were found. On uncovered forest lands, forest seeding potential is maintained at a distance of 30–35 m from seed trees or the forest wall. The absence of a direct dependence of the density and occurrence of pine species on the area of the reforestation site was found, the intensity of the grass-shrub layer has a greater effect. It has been experimentally proved that the coincidence of the time of soil mineralization with the time of seed-bearing affects the course of formation of the young generation of pine, but it is not the only factor affecting the success of the course of natural regeneration of the forest.

Key words: Scots pine, natural forest regeneration, cutting area, glade, seed tree, forest stand.

Введение. В настоящее время актуальна проблема воспроизводства хвойных насаждений [1, 2]. Кроме того, в последние годы произошло короедное усыхание сосновых насаждений [3, 4]; сплошные санитарные рубки проведены в насаждениях страны на площади свыше 70,0 тыс. га (2014–2018 гг.) [5].

Необходимость качественного лесовосстановления участков вырубок, прогалин (73,5 тыс. га на 01.01.2019 [6]) в условиях климатических изменений и снижения общей площади сосновых древостоев на 5,2% за последние 10 лет [6, 7] свидетельствует о важности исследования особенностей формирования естественного возобновления сосны в результате проводимых лесохозяйственных мероприятий. Подрост предварительной генерации, образующийся под пологом насаждений, во многих случаях мог бы стать частью будущего

молодого насаждения, поэтому анализ его наличия, качества и перспектив сохранения также является важным и интересным.

Особенности естественного возобновления сосны на непокрытых лесом землях изучались некоторыми белорусскими учеными [8–10], однако эти исследования относятся в основном к вырубкам конкретных регионов страны; естественное возобновление сосны на прогалинах, а также на участках вырубок после проведения сплошных санитарных рубок в Беларуси практически не изучалось.

Российскими учеными анализировалась также успешность естественного возобновления сосны на участках, вышедших из-под сельскохозяйственного пользования в зависимости от некоторых факторов, в том числе от расстояния до источников обсеменения [11].

Отечественными и зарубежными авторами также признается важность исследования предварительного и сопутствующего формирования соснового подроста под пологом насаждений, в частности, выявлено влияние сомкнутости верхнего яруса древостоя на качественные и количественные характеристики особей естественного возобновления сосны [12–15].

Основная часть. Для выявления потенциала предварительного естественного возобновления сосны определены характеристики подроста под пологом приспевающих, спелых и перестойных сосновых насаждений с использованием актуальных лесоустроительных баз данных (на 01.01.2019) по 115 лесхозам Беларуси.

С использованием программных средств Microsoft Excel была произведена группировка лесохозяйственных учреждений по геоботаническим подзонам с последующими необходимыми подсчетами.

Было установлено, что в подзоне дубово-темнохвойных лесов сосредоточены наибольшие площади приспевающих, спелых и перестойных насаждений, под пологом которых имеется подрост всех пород на 48,6% от площади, подрост главных пород (хвойных – сосны и ели; твердолиственных – дуба, клена и ясеня; мягколиственных – березы; для других подзон главные породы установлены аналогичным образом) – на 44,5% площади. Обеспечено в достаточном количестве подростом главных пород 12,0% от площади. В подзоне грабово-дубово-темнохвойных лесов под пологом приспевающих, спелых и перестойных насаждений имеется подрост всех пород на 43,9% от площади, подрост главных пород – на 42,0% от площади. Обеспечено в достаточном количестве главными породами 8,5% от площади. В геоботанической подзоне широколиственно-сосновых лесов под пологом приспевающих, спелых и перестойных насаждений имеется подрост всех пород на 41,7% от площади, подрост главных пород – на 39,8% от площади. Обеспечено в достаточном количестве главными породами лишь 4,2% от площади. Таким образом, в этом регионе наихудшие перспективы лесовосстановления (95,8% площади приспевающих, спелых и перестойных насаждений не обеспечено подростом главных пород в достаточном количестве). В табл. 1 приводится характеристика подроста под пологом приспевающих, спелых и перестойных сосновых насаждений. В табл. 2, которая приводится далее, содержится характеристика подроста под пологом исследованных участков.

Таблица 1

Характеристика подроста под пологом сосновых насаждений Беларуси

Геоботаническая подзона	Площадь приспевающих, спелых и перестойных насаждений, га	В том числе с наличием подроста				Перспективы лесовосстановления			
		Всех пород		Из них главных		Обеспечено в достаточном количестве главными породами		Не обеспечено в достаточном количестве главными породами	
		Площадь, га	В процентах от площади	Площадь, га	В процентах от площади		В процентах от площади		В процентах от площади
Дубово-темнохвойных лесов	415 247,3	194 521,2	46,8	184 992,6	44,5	49 724,6	12,0	365 522,7	88,0
Грабово-дубово-темнохвойных лесов	400 991,0	176 179,4	43,9	168 428,3	42,0	34 185,1	8,5	366 805,9	91,5
Широколиственно-сосновых лесов	261 166,0	108 787,7	41,7	104 056,8	39,8	11 089,1	4,2	250 076,9	95,8
Всего по стране	1 077 404,3	479 488,3	44,5	457 477,7	42,5	94 998,8	8,8	982 405,5	91,2

Таблица 2

Участие подроста предварительной генерации в формирующихся при последующем естественном возобновлении сосновых молодняках

Категории участков	Обеспечено подростом главных пород до проведения рубки		Формируется сосновый подрост после проведения хозмероприятий в достаточном количестве		
	Всего, %	Из них сосновым подростом, %	Всего, %	На участках с предварительным подростом всех пород, %	На участках с предварительным подростом сосны, %
Вырубки	52,1	16,5	86,0	77,3	100,0
Под пологом леса	60,4	48,5	24,4	21,9	23,6

По данным таксационных описаний объектов закладки временных пробных площадей (далее – ВПП) была получена информация по наличию подроста на участках вырубок до проведения рубок (22 ВПП, преобладают сплошные санитарные рубки), на участках с проведением рубок промежуточного пользования (25 ВПП) и на участках с проведением постепенных рубок главного пользования (26 ВПП) в суходольных типах леса. Исследовалось состояние подроста, сформировавшегося предварительно до проведения хозмероприятий, а также потенциал сохранения этого подроста и его участие в формировании будущих молодняков.

На участках вырубок предварительно сформировавшийся под пологом сосновый подрост с большой долей вероятности стал частью формирующихся сосновых молодняков. До проведения рубок насаждения с сосновым подростом составляли 16,5% от доли насаждений, обеспеченных подростом главных пород. 86,0% обследованных участков вырубок обеспечены естественным возобновлением сосны в достаточном количестве.

На участках с обследованием подроста сосны под пологом леса было выявлено, что лишь 24,4% площадей обеспечены естественным возобновлением сосны. Подростом главных пород было обеспечено 60,4% участков до проведения хозмероприятий, из них сосновым подростом – 48,5% насаждений. При проведении первых приемов полосно-постепенных рубок в оставленных полосах полнота составляет 0,6–0,7, следовательно, световые условия по сравнению с насаждением до проведения рубки практически не изменяются, что не способствует формированию соснового подроста. Потенциал сохранения и формирования естественного возобновления сосны на участках с проведением рубок обновления также имеется, однако в этом случае сосновый подрост будет приурочен преимущественно к образующимся при проведении рубки «окнам».

Процесс хода естественного возобновления сосны под пологом леса довольно непредсказуем – резкая смена светового режима отрицательно влияет на уже сформированную часть подроста. В результате на исследованных участках даже с наличием предварительной генерации соснового подроста только на 23,6% участков имеется благонадежный сосновый подрост в достаточном количестве. Однако полностью полагаться на лесоустроительные материалы в области описания подроста под пологом насаждений не стоит, так как подробному описанию с инструментальными измерениями подвергается подрост лишь в приспевающих, спелых и перестойных насаждениях, в которых возможно назначение рубки с сохранением подроста. Таким образом, проведение рубок промежуточного пользования и постепенных рубок главного пользования может повлиять на формирование соснового подроста как положительно (улучшение световых условий, нарушение живого напочвенного покрова (далее – ЖНП)), так и негативно (резкое изменение светового режима, механическое повреждение подроста предварительной генерации).

Последующее естественное возобновление сосны и факторы, влияющие на его формирование. Исследование последующего естественного возобновления сосны проводилось по результатам анализа 24 ВПП, заложенных на прогалинах, и 26 ВПП, заложенных на вырубках (из них 24 ВПП – после проведения сплошных санитарных рубок).

В табл. 3 приводятся результаты корреляционного анализа влияния ряда факторов на ход естественного возобновления сосны. ВПП закладывались методом трансект со сплошным перечетом особей древесных пород. Учитывалась густота, встречаемость, микроположение, качество подроста, интенсивность травяно-кустарничкового яруса (далее – ТКЯ), мохово-лишайникового яруса (далее – МЛЯ) и другие факторы. Выявлено, что площадь участка лесовосстановления слабо коррелирует с густотой и встречаемостью естественного возобновления сосны.

Таблица 3

Корреляционный анализ некоторых факторов и показателей естественного возобновления сосны на непокрытых лесом землях

Показатели	Площадь участка	Год содействия	Возраст самосева	Высота самосева	Густота самосева	Встречаемость самосева	Интенсивность ТКЯ	Интенсивность МЛЯ
Площадь участка	1,00	–	–	–	–	–	–	–
Год содействия	–	1,00	–	–	–	–	–	–
Возраст самосева	–	–0,78	1,00	–	–	–	–	–
Высота самосева	–	–0,76	0,86	1,00	–	–	–	–
Густота самосева	0,04	0,05	–0,07	–0,11	1,00	–	–	–
Встречаемость самосева	–0,06	–0,11	0,13	0,08	0,69	1,00	–	–
Интенсивность ТКЯ	–	0,14	–0,29	–0,37	–0,23	–0,38	1,00	–
Интенсивность МЛЯ	–	–0,44	0,51	0,41	0,26	0,18	–0,23	1,00

На исследованных участках вырубок на площадях >0,5 га наблюдается большая густота образующегося естественного возобновления сосны (>4,0 тыс. шт./га). На прогалинах большая густота соснового самосева – на участках <0,5 га, есть тенденция формирования более густых насаждений на мелкоконтурных участках. Встречаемость особей сосны имеет аналогичную закономерность.

Выявлена слабая отрицательная корреляционная связь интенсивности травяно-кустарничкового яруса с густотой (r = –0,23) и более сильная – со встречаемостью (r = –0,38); интенсивность мохового яруса коррелирует положительно (r = 0,26 для густоты и r = 0,18 для встречаемости). В молодняках большего возраста наблюдается более высокая интенсивность МЛЯ, по мере формирования естественного молодняка интенсивность ТКЯ снижается. Год проведения мероприятия по содействию естественному возобновлению леса слабо коррелирует с густотой (r = –0,05) и встречаемостью (r = –0,11), т. е. давность минерализации почвы не влияет на успешность лесовосстановления конкретного участка.

Особи сосны на вырубках в первые годы сосредотачиваются по дну борозды, однако на 3–5-летних вырубках большая часть деревцев расположена уже между борозд, где меньше световая конкуренция. В условиях B_3 большая часть экземпляров сосны расположена на пласте, где не так интенсивно происходит зарастание травянистой растительностью и мхами. В целом по дну борозды сосредоточено лишь 22,7% естественных особей сосны; между борозд – 16,8%; на пласте – 18,0%; на микроповышениях – 18,1%; в микропонижениях рельефа – 13,0%; на равнинных участках без видимых признаков изменения макрорельефа – 11,4%. Это означает, что техническое средство и способ обработки почвы не влияют существенным образом на ход естественного возобновления сосны. Сосновый подрост формируется довольно активно и на частях вырубок без проведения глубокой минерализации почвы, достаточно лишь нарушения ЖНП. Плуг ПКЛ-70, который использовался на подавляющем большинстве исследованных участков, можно считать достаточно эффективным средством для проведения минерализации почвы.

В табл. 4 приводятся ***характеристики ЖНП*** на исследованных ВПП под пологом насаждений и на участках непокрытых лесом земель в ТУМ A_2 и B_2. По непокрытым лесом землям данные определялись для участков прогалин, вырубок, участков с созданными лесными культурами (всего 85 ВПП, включая участки с проведением первых приемов полосно-постепенных рубок – на вырубленных полосах); ЖНП под пологом леса анализировался на участках с проведением рубок промежуточного пользования и постепенных рубок главного пользования.

Под пологом в ТУМ A_2 отмечено 13 видов ТКЯ, наибольшая встречаемость и проективное покрытие – у *Vaccinium myrtillus L.* В ТУМ B_2 видовое разнообразие ТКЯ выше – отмечено 17 видов.

На непокрытых лесом землях в ТУМ A_2 видовое разнообразие представлено 23 видами, наибольшая встречаемость – у *Festuca ovina L.* (42%), наибольшее проективное покрытие – у *Calluna vulgaris (L.) Hill.* (21%), который покрывает наибольшие площади, и в ТУМ B_2 (19%), где наибольшая встречаемость отмечена у *Vaccinium myrtillus L.* (23%).

МЛЯ во всех ТУМ представлен 7 видами. В ТУМ A_2 практически на всех участках отмечен *Pleurozium schreberi (Brid.) Mitt.* (проективное покрытие под пологом леса свыше 60%, на непокрытых лесом землях – свыше 20%).

Таблица 4

Характеристика живого напочвенного покрова на исследованных временных пробных площадях

Наименование видов растений живого напочвенного покрова		Локация							
		Под пологом насаждений				Непокрытые лесом земли			
		ТУМ A_2		ТУМ B_2		ТУМ A_2		ТУМ B_2	
		Встречаемость, %	Проективное покрытие, %	Встречаемость, %	Проективное покрытие, %	Встречаемость, %	Проективное покрытие, %	Встречаемость, %	Проективное покрытие, %
Травяно-кустарничковый ярус	*Vaccinium myrtillus L.*	76	35	81	38	18	5	23	7
	Festuca ovina L.	52	7	33	4	42	5	22	2
	Calluna vulgaris (L.) Hill.	25	16	18	7	31	21	18	19
	Hieracium umbellatum L.	19	2	18	2	5	<1	–	–
	Maiánthemum bifólium	16	<1	–	–	11	<1	9	<1
	Pteridium aquilinum (L.) Kuhn.	15	1	65	5	5	<1	32	2
	Melampyrum pratense L.	15	1	–	–	27	2	15	2
	Óxalis acetosélla	10	11	28	21	–	–	–	–
	Agrostis tenuis Sibth.	8	2	5	<1	15	5	5	2
	Pyrola rotundifolia L.	7	2	–	–	5	<1	–	–
	Poa nemoralis L.	7	1	5	<1	21	2	11	2
	Cladonia sylvatica (L.) Hoffm.	7	<1	10	2	5	5	7	2
	Convallaria majalis L.	5	5	5	2	–	–	2	<1
	Deschampsia cespitosa (L.) Beauv.	–	–	21	5	–	–	16	2
	Fragaria vesca L.	–	–	8	1	5	<1	–	–
	Calamagrostis epigeios (L.) Roth.	–	–	7	5	2	<1	5	<1
	Vaccinium vitis-idaea L.	–	–	5	1	7	1	5	<1
	Pulmanaria angustifolia	–	–	5	<1	–	–	–	–
	Equisétum arvénse	–	–	3	<1	15	2	10	1
	Urtica dioica L.	–	–	2	<1	2	1	–	–
	Luzula pilosa Will.	–	–	–	–	32	2	15	1
	Sieglingia decumbens (L.) Bernh.	–	–	–	–	10	2	9	<1
	Nardus stricta	–	–	–	–	9	<1	5	<1
	Knautia arvensis (L.) Coult.	–	–	–	–	7	2	–	–
	Carex ericetorum Poll.	–	–	–	–	5	5	2	<1
	Chamaenerion angustifolium L.	–	–	–	–	5	3	–	–
	Anthoxanthum odoratum L.	–	–	–	–	5	<1	5	<1
Мохово-лишайниковый ярус	*Pleurozium schreberi (Brid.) Mitt.*	100	62	31	10	98	25	74	17
	Dicranum polysetum Hedw.	35	11	76	33	21	7	63	18
	Polytrichum juniperinum Hedw.	21	10	15	5	20	10	28	15
	Polytrichum commune Hedw.	11	5	27	28	7	2	15	10
	Dicranum polysetum Hedw.	10	2	11	2	7	2	10	3
	Cladonia sylvatica (L.) Hoffm.	7	<1	10	2	5	5	7	2
	Marchantia polymorpha L.	7	<1	5	<1	2	<1	2	<1

В ТУМ B_2 под пологом леса наиболее распространен *Dicranum polysetum Hedw.* (отмечен на 76% участков, проективное покрытие – 33%); на непокрытых лесом землях большая встречаемость у *Pleurozium schreberi (Brid.) Mitt.* (74%), большее проективное покрытие – у *Dicranum polysetum Hedw.* (18%).

Одним из важнейших факторов, влияющих на формирование естественного возобновления сосны, является наличие ***источников обсеменения*** (единичные деревья, оставленные после проведения рубки, или стена леса с подветренной стороны), а также расстояние до них.

На рисунке приводится распределение густоты естественного возобновления сосны на исследованных ВПП, заложенных на участках непокрытых лесом земель, в зависимости от расстояния до источников обсеменения.

Влияние расстояния от источника обсеменения на ход естественного возобновления сосны на участках непокрытых лесом земель

На прогалинах наибольшее количество экземпляров сосны расположено на расстоянии 5–10 м от источников обсеменения (38,7%), обсеменительный потенциал сохраняется до расстояния около 20 м, далее количество особей сосны значительно снижается. На вырубках наибольшее количество экземпляров сосны сосредоточено на расстоянии от 10 до 15 м (26,2%), лесообсеменительный эффект сохраняется на расстоянии до 30 м от деревьев-семенников. В целом на участках непокрытых лесом земель наилучшим образом естественное возобновление сосны идет на расстоянии 5–20 м, лесообсеменительный потенциал сохраняется на расстоянии до 30–35 м от семенных деревьев или стены леса. Следует отметить также, что в непосредственной близости к семенным деревьям (на расстоянии до 5 м) отмечается небольшая доля всходов (до 5%), что связано с корневой конкуренцией.

При наличии равномерно расположенных семенных деревьев по площади участка (ТУМ A_2, B_2) или стены леса с направления преобладающих ветров на расстоянии до 30–35 м обсеменение сосной может происходить успешно вне зависимости от площади участка, и этот фактор необходимо учитывать при назначении лесовосстановительного мероприятия.

Опыт высева семян в естественных условиях. Для выявления лесоводственной эффективности посева сосны как меры содействия естественному возобновлению леса на территории Копыльского лесничества ГОЛУ «Копыльский опытный лесхоз» на участке вырубки (2 участка площадью 0,1 га), а также под пологом насаждения с проведением первого приема рубки обновления в Орликовском лесничестве (2 участка площадью 0,1 га) был произведен опытный подсев семян сосны обыкновенной (далее – СО) и ее сорта – сосны «Негорельской» (далее – сосна негорельская, СН).

Цель опыта – выявление зависимости всхожести от фактора семеношения и местоположения участка (непокрытые лесом земли или под пологом леса), а также ход естественного возобновления сосны после прорастания семян. Интерес представляет и сравнение всхожести семян, и последующее развитие молодых экземпляров сосны обыкновенной и сосны негорельской.

Сев производился в мае 2016 г. вручную в открытый грунт, с одновременным поливом в местах с отсутствием подроста и самосева предварительной генерации. Глубина заделки семян – 1–2 см, ширина борозд – 3–5 см, шаг высева – 1,0 м, густота высева семян – 1,5–2,0 г на 1 погонный метр. Обработка почвы производилась граблями – путем сдирания МЛЯ (в местах его наличия) на площади около 30% от площади участков с закладкой опытных объектов.

В табл. 5 приводятся характеристики самосева (густота и встречаемость) на участках с проведенным подсевом сосны обыкновенной и сосны негорельской. Производился сплошной перечет всходов с переводом количества на 1 га площади.

Исходя из полученных результатов, можно сделать выводы, что подсев семян как мера содействия имеет смысл только на участках непокрытых лесом земель; под пологом насаждений самосев формируется в условиях дефицита освещенности и влаги (даже при условии высева в «окнах») и имеет угнетенное состояние. Лучший потенциал всхожести семян наблюдается в ТУМ A_2 по сравнению с ТУМ B_2, что может быть связано с условиями микрорельефа и почвенным плодородием. Сосна негорельская имеет слабые показатели всходов в открытом грунте по сравнению с сосной обыкновенной как на участках непокрытых лесом земель, так и под пологом леса. Впрочем, это может быть связано и с недостаточно качественным посевным материалом.

Таблица 5

Характеристика естественного возобновления леса

Локация	Характеристика всходов сосны: числитель – густота, тыс. шт./га, знаменатель – коэффициент встречаемости					
	1 год спустя		2 года спустя		3 года спустя	
	СО	СН	СО	СН	СО	СН
Вырубка	6,9 0,75	2,1 0,24	7,3 0,81	1,5 0,16	7,2 0,79	1,2 0,11
Под пологом	2,3 0,55	0,3 0,05	2,1 0,49	0,1 0,01	2,0 0,45	0,1 0,01

Данный опыт показывает, что совпадение времени проведения минерализации почвы со временем семеношения семенных деревьев (высев в минерализованную почву имитировал такие условия) оказывает влияние на ход образования молодого поколения сосны, однако не является единственным фактором, влияющим на успешность хода естественного возобновления леса.

Современная практика лесовосстановления. За последнее пятилетие наблюдается увеличение доли сосны в общем объеме лесовосстановления, в том числе и по естественному возобновлению леса, большая часть которого приходится на меры содействия на непокрытых лесом землях. Наблюдается негативная тенденция по сохранению соснового подроста при проведении рубок главного пользования, что во многих случаях связано с технологической сложностью проведения данного мероприятия при использовании современной многооперационной техники, а также с недостатком квалификации и опыта сотрудников лесхозов.

В 2019 г. в общем объеме лесовосстановления на сосну приходилось 55,4%. Преобладало создание лесных культур (75,4%), на меры содействия естественному возобновлению леса приходилось 14,1%. Под естественное возобновление без мер содействия было оставлено 10,5% участков. Лишь 25,0 га сосны было сохранено при проведении сплошнолесосечных рубок главного пользования с сохранением подроста, при несплошных – 75,0 га [6], что говорит о проблемах при выполнении полного цикла данных видов рубок главного пользования как по объемам, так и по технологии.

В табл. 6 приводится анализ выполнения запроектированных лесоустройством объемов лесовосстановительных мероприятий в лесхозах, затронутых исследованием. По половине исследованных лесхозов наблюдается недовыполнение объемов создания лесных культур; в некоторых учреждениях это связано с увеличившимися объемами вырубок из-за массового проведения сплошных санитарных рубок в короедных очагах усыхания (Любанский). Невыполнение объемов намеченных лесовосстановительных мероприятий во многих случаях связано с недоосвоением расчетной лесосеки.

Таблица 6

Выполнение лесовосстановительных мероприятий

Лесхоз	Виды лесовосстановительных мероприятий, площадь, га								
	Лесные культуры			Содействие естественному возобновлению леса			Естественное возобновление леса		
	Проект	Выполнено		Проект	Выполнено		Проект	Выполнено	
		га	%		га	%		га	%
Ушачский	4644	2076	44,7	264	583	220,8	3768	893	23,7
Вилейский	3398	5718	168,3	887	1167	131,6	1546	728	47,1
Горецкий	3258	5000	153,5	680	513	75,4	1165	771	66,2
Бегомльский	2090	1670	79,9	359	413	115,0	1488	1394	93,7
Копыльский	1968	1218	61,9	14	116	828,5	1171	795	67,9
Щучинский	3570	3791	106,2	233	273	117,2	1765	1698	96,2
Барановичский	1813	1735	95,7	1372	487	35,5	2214	653	29,5
Гомельский опытный	4748	7050	148,5	2165	1415	65,4	2773	2970	107,1
Буда-Кошелевский опытный	2869	4688	163,4	178	597	335,4	2003	1612	80,5
Любанский	3085	1956	63,4	125	115	92,0	2752	2425	88,1
Кореневская ЭЛБ	280	454	162,1	9	13	144,4	179	217	121,2
Ивацевичский военный	729	518	71,1	106	132	124,5	1217	854	70,2

Недовыполнение объемов содействия естественному возобновлению леса связано, кроме прочего, с некачественным проведением постепенных рубок. Переход на формирование ведомости рубок главного пользования из совокупности таксационных выделов, в которых разрешено проведение рубок на момент прохождения экологической экспертизы, позволил бы лесхозам проводить приемы рубок по мере успешности формирования подроста и создал бы маневр для более качественной лесозаготовки, ориентированной на естественное лесовосстановление.

Основной вид проведения мер содействия естественному возобновлению леса – минерализация почвы. Отмечены малые объемы создания частичных лесных культур. Подсев семян и огораживание практически не используются. В результате в исследованных лесхозах удовлетворительно возобновляется сосной около 50% участков с переводом в покрытые лесом земли. Этот процент можно было бы увеличить при огораживании участков, а также при проведении мер ухода за подростом.

В ходе данного исследования приводится сравнительный анализ **экономической эффективности проведения рубок главного пользования.** Полосно-постепенные рубки интересны тем, что на них распространяются некоторые послабления (снижение попенной платы, норм выработки), характерные для постепенных рубок, но вместе с тем они имеют более простую технологию проведения, приближенную к таковой на сплошнолесосечных рубках, а результатом их проведения должно стать естественное возобновление леса. Кроме того, в настоящее время этот вид рубок при лесоустройстве может намечаться в сосновых насаждениях при полном отсутствии подроста (в связи с чем их доля достигает свыше 90% от общего объема несплошных рубок).

К проведению завершающего приема полосно-постепенной рубки под пологом оставленных полос не всегда накапливается достаточное количество подроста. Поэтому при настоящем исследовании в сравнение добавлен неклассический вариант полосно-постепенной рубки с созданием лесных культур после проведения завершающего приема рубки. Таким образом, приводится сравнение следующих видов рубок (для ТУМ A_2): сплошная рубка без сохранения подроста с созданием лесных культур (далее – СРГП); полосно-постепенная 2-приемная рубка с проведением мер содействия на вырубленных полосах и под пологом оставленных полос при проведении первого приема рубки (далее – ППР, вариант № 1); гипотетический вариант полосно-постепенной 2-приемной рубки с последующим созданием лесных культур после проведения заключительного приема рубки (далее – ППР, вариант № 2).

В табл. 7 приводятся технико-экономические показатели проектов рубок главного пользования (на 1 га). Наибольшая экономическая эффективность наблюдается при проведении 2-приемной ППР, что связано со снижением попенной платы (на 5%) и возрастанием доходов от реализации продукции благодаря дополнительному приросту на 23,5 м^3.

Успешность проведения ППР зависит от ряда факторов. Должно произойти обсеменение вырубленных полос при проведении 1 приема ППР; оставленные полосы должны быть изрежены на 20–25% с проведением частичной минерализации почвы (до 20% площади участка); к проведению завершающего приема рубки под пологом оставленных полос должен образоваться подрост главных пород в необходимом количестве, который будет сохранен при проведении рубки. Если рассматривать вариант, при котором потребуется создание лесных культур – экономическая эффективность будет на уровне таковой у СРГП за счет разницы в приросте ликвидной древесины и уменьшения в 2 раза площади создания лесных культур. В этом случае рекомендуется снижение попенной платы на 2%. Большие затраты на проведение рубки будут компенсированы прибылью от реализации продукции.

Таблица 7

Сравнительная экономическая эффективность по видам рубок

Показатели	СРГП	ППР (вариант № 1)	ППР (вариант № 2)
Попенная плата, руб.	2334,44	2470,49	2519,89
Объем работ, м^3	213,5	237,0	237,0
Себестоимость рубок, руб.	3863,79	4512,71	4562,12
Затраты на лесовосстановление, руб.	3401,84	1726,38	2564,11
Трудозатраты, чел.-дни	53,83	37,85	61,76
Доходы от реализации продукции, руб.	9993,08	11 144,58	11 144,58
Прибыль, руб.	6129,29	6631,87	6582,46
Экономическая эффективность	0,38	0,44	0,39

Заключение. В ходе данного исследования выявлено, что всего 8,8% сосняков Беларуси обеспечены подростом главных пород. Сопутствующему естественному возобновлению сосны способствует проведение рубок промежуточного и главного пользования.

На участках непокрытых лесом земель при наличии источников обсеменения на расстоянии 5–20 м с нарушением живого напочвенного покрова под семенной год возможно успешное формирование сосновых молодняков. Совпадение времени проведения минерализации почвы со временем семеношения оказывает влияние на ход образования молодого поколения сосны, однако не является единственным фактором, влияющим на успешность хода естественного возобновления леса.

Анализ современной практики лесовосстановления показал, что многими лесхозами игнорируются такие меры содействия, как создание частичных лесных культур, подсев семян и огораживание участков. Существуют негативные тенденции в практике проведения несплошных рубок главного пользования.

При проведении полосно-постепенных рубок главного пользования возможно было бы рассмотреть вариант создания лесных культур в случае неудовлетворительного проведения последнего приема рубки. В этом случае рекомендуется снижение попенной платы на 2%.

Список литературы

1. Рожков Л. Н., Ерошкина И. Ф. Воспроизводство сосновой формации Беларуси в свете сохранения микропопуляционного разнообразия на уровне эдафоклиматипов // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. ИЛ НАН Беларуси. 2015. Вып. 75. С. 126–137.

2. Рожков Л. Н. Проблемы воспроизводства сосны в Беларуси // Лесное и охотничье хозяйство. 2003. № 2. С. 6–7.

3. Отчет о результатах экспедиционного лесопатологического обследования насаждений ГЛХУ «Любанский лесхоз», ГЛХУ «Петриковский лесхоз» и ГОЛХУ «Мозырский опытный лесхоз» специалистами РУП «Белгослес» по состоянию на 1 ноября 2017 года / А. А. Сазонов [и др.]. Минск: Белгослес, 2017. № 3. 19 с.

4. Луферов А. О., Лабоха К. В. Содействие естественному возобновлению как основной метод лесовосстановления в условиях усыхания сосны // Труды БГТУ. 2018. Серия 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. № 2. С. 56–62.

5. Усеня В. В., Гордей Н. В., Каткова Н. Н., Тегленков Е. А. Анализ динамики усыхания хвойных насаждений на территории Беларуси // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. ИЛ НАН Беларуси. 2019. Вып. 79. С. 166–176.

6. Государственный лесной кадастр Республики Беларусь по состоянию на 01.01.2019. Минск: Белгослес, 2019. 62 с.

7. Лабоха К. В., Луферов А. О., Карась А. Н. Современное состояние сосновых лесов Беларуси // Труды БГТУ. 2020. Серия 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. № 1. С. 28–38.

8. Юркевич И. Д., Голод Д. С. Совершенствование рубок в связи с типами и естественным возобновлением леса. Минск: Наука и техника, 1968. 116 с.

9. Пугачевский А. В., Серенкова В. А. Оценка лесовосстановительных процессов на вырубках сосновых фитоценозов Белорусского Полесья // Труды БГТУ. 2015. № 1 (174): Лесное хоз-во. С. 83–86.

10. Серенкова В. А., Потапенко А. М. Оценка предварительного и последующего естественного возобновления сосны обыкновенной (*Pinus Sylvestris L.*) в условиях Белорусского Полесья // Труды БГТУ. 2016. № 1 (183): Лесное хоз-во. С. 70–73.

11. Теория и практика естественного возобновления леса: электронное учебное пособие. Йошкар-Ола, 2009. URL: http://csfm.volgatech.net/elearning/vozobnovlenie/text/acknowledgement.html (дата обращения: 27.03.2020).

12. Юркевич И. Д. Естественное возобновление в водоохранных лесах БССР. Минск: ГИЗ БССР, 1939. 68 с.

13. Zhu J. J., Matsuzaki T., Lee F. Q., Gonda Y. Effect of gap size created by thinning on seedling emergency, survival and establishment in a coastal pine forest // Forest Ecology and Management. 2003. No. 182 (1–3). P. 339–354.

14. Gil W., Kopryk W., Zachara T. Growth dynamics of Scots pine natural regeneration under the shelter of the stand in Polish lowland – A case study Ostrów Mazowiecka // Folia Forestalia Polonica. Series A – Forestry. 2004. No. 46. P. 21–28.

15. Barbeito I., Fortin M. J., Montes F., Cañellas I. Response of pine natural regeneration to small-scale spatial variation in a managed Mediterranean mountain forest // Applied Vegetation Science. 2009. No. 12 (4). P. 488–503.

References

1. Rozhkov L. N., Yeroshkina I. F. Reproduction of the pine formation of Belarus in the light of the preservation of micropopulation diversity at the level of edaphoclimates *Problemy lesovedeniya i lesovodstva* [Problems of forestry and silviculture], 2015, vol. 75, pp. 126–137 (In Russian).

2. Rozhkov L. N. Problems of reproduction of pine in Belarus. *Lesnoye i okhotnich'ye khozyaystvo* [Forestry and hunting], 2003, no. 2, pp. 6–7 (In Russian).

3. *Otchet o rezul'tatakh ekspeditsionnogo lesopatologicheskogo obsledovaniya nasazhdeniy GLKhU "Lyubanskiy leskhoz", GLKhU "Petrikovskiy leskhoz" i GOLKhU "Mozyrskiy opytnyy leskhoz" spetsialistami RUP "Belgosles" po sostoyaniyu na 1 noyabrya 2017 goda* [Report on the results of the expedition forest pathological survey of the plantations of the Luban Forest Enterprise, Petrikov Forest Enterprise and Mozyr Experimental Forest Enterprise by specialists of RUE "Belgosles" as of November 1, 2017]. Minsk, Belgosles Publ., 2017, no. 3. 19 p.

4. Luferov A. O., Labokha K. V. Assistance to natural regeneration as the basic method of reforestation in conditions of dieback of pine forests. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forestry. Nature management. Processing of renewable resources, 2018, no. 2, pp. 56–62 (In Russian).

5. Usenya V. V., Gordey N. V., Katkova N. N., Teglenkov E. A. Analysis of the dynamics of dieback of coniferous stands on the territory of Belarus. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva* [Problems of forestry and silviculture], 2019, vol. 79, pp. 166–176 (In Russian).

6. *Gosudarstvenniy lesnoy kadastr Respubliki Belarus' po sostoyaniyu na 01.01.2019* [The State Forest Cadastre of the Republic of Belarus as of 01.01.2019]. Minsk, Belgosles Publ., 2019. 62 p.

7. Labokha K. V., Luferov A. O., Karas' A. N. Current state of the pine forests of Belarus. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forestry. Nature management. Processing of renewable resources, 2020, no. 1, pp. 28–38 (In Russian).

8. Yurkevich I. D., Golod D. S. *Sovershenstvovaniye rubok v svyazi s tipami i yestestvennym vozobnovleniyem lesa* [Improvement of logging in connection with the types and natural regeneration of the forest]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1968. 116 p.

9. Pugachevsky A. V., Serenkova V. A. Assessment of reforestation processes on cutting areas of pine phytocenoses of the Belarusian Polesye. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 1 (174): Forestry, pp. 83–86 (In Russian).

10. Serenkova V. A., Potapenko A. M. Assessment of the preliminary and subsequent natural regeneration of Scots pine (Pinus Sylvestris L.) in the conditions of Belarusian Polesie. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 1 (183): Forestry, pp. 70–73 (In Russian).

11. *Teoriya i praktika yestestvennogo vozobnovleniya lesa* [Theory and practice of natural forest regeneration]. Yoshkar-Ola, 2009. Available at: http://csfm.volgatech.net/elearning/vozobnovlenie/text/acknowledgement.html (accessed 03.27.2020).

12. Yurkevich I. D. *Yestestvennoye vozobnovleniye v vodookhrannykh lesakh BSSR* [Natural regeneration in the water protection forests of the BSSR]. Minsk, GIZ BSSR Publ., 1939. 68 p.

13. Zhu J. J., Matsuzaki T., Lee F. Q., Gonda Y. Effect of gap size created by thinning on seedling emergency, survival and establishment in a coastal pine forest. *Forest Ecology and Management*, 2003, no. 182 (1–3), pp. 339–354.

14. Gil W., Kopryk W., Zachara T. Growth dynamics of Scots pine natural regeneration under the shelter of the stand in Polish lowland – A case study Ostrów Mazowiecka. *Folia Forestalia Polonica*. *Series A – Forestry*, 2004, no. 46, pp. 21–28.

15. Barbeito I., Fortin M. J., Montes F., Cañellas I. Response of pine natural regeneration to small-scale spatial variation in a managed Mediterranean mountain forest. *Applied Vegetation Science*, 2009, no. 12 (4), pp. 488–503.

Информация об авторе

Луферов Антон Олегович – магистр сельскохозяйственных наук, начальник партии лесоустроительной. РДЛУП «Гомельлеспроект» (246027, г. Гомель, ул. Встречная 1-я, 35, Республика Беларусь). E-mail: anton.luferov@tut.by.

Information about the author

Luferov Anton Olegovich – Master of Agriculture, Head of the Forest Inventory Party. RSFUE "Gomellesproekt" (35, Vstrechnaya 1-st str., 246027, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: anton.luferov@tut.by.

Поступила 30.03.2020

УДК 630*245:630*614

Л. Н. Рожков
Белорусский государственный технологический университет

ВЛИЯНИЕ УХОДА ЗА МОЛОДНЯКАМИ НА ПОРОДНУЮ СТРУКТУРУ ЛЕСНОГО ФОНДА

Рассматривается динамика участия хвойных, твердолиственных и мягколиственных насаждений в лесном фонде. Анализ выполнен по материалам Государственного учета лесов Республики Беларусь за 1966–2020 гг. Установлены изменения долевого участия насаждений в разрезе групп пород на этапах перевода возобновления в категорию ценных насаждений, а также возрастных периодов 8–20 лет для проведения осветлений/прочисток и 21–40-летнего периода как объекта прореживаний/проходных рубок. Выявлена негативная устойчивая тенденция существенного снижения качественной ценности по показателю участия главных пород (хвойных и твердолиственных) в составе насаждений на всех этапах лесовыращивания от 8- до 40-летнего возраста. Обращается внимание на необходимость научных исследований для установления причин проявления этой проблемы. Предложены важнейшие направления научно-технической и инновационной деятельности в области ухода за лесом.

Ключевые слова: природная структура лесов, воспроизводство леса, уход за лесом в 8–40-летнем возрасте, влияние уходов на породную структуру лесов Беларуси.

L. N. Rozhkov
Belorusian State Technological University

INFLUENCE OF CARE FOR YOUNG FORESTS ON RELATED STRUCTURE OF FOREST FUND

The dynamics of the participation of coniferous, hard-leaved and soft-leaved plantations in the forest fund is considered. The analysis is based on the materials of the State Forest Accounting of the Republic of Belarus for 1966–2020. Changes in the share of plantations in the context of rock groups at the stages of transferring renewal to the category of valuable plantations, as well as age periods of 8–20 years for clarifications/cleanings and a 21–40 year period as an object of thinning/clear cutting, have been established. A negative steady tendency of a significant decrease in the quality value was revealed in terms of the participation of the main species (coniferous and hard-leaved) in the stands at all stages of forest cultivation from 8 to 40 years of age. Attention is drawn to the need for scientific research to establish the causes of this problem. The most important areas of scientific, technical and innovative activities in the field of forest care are proposed.

Key words: natural forest structure, forest reproduction, forest care at the age of 8–40 years, the effect of care on the species structure of forests in Belarus.

Введение. Переводом в покрытые лесом земли несомкнувшихся лесных культур и участков естественного возобновления с мерами и/или без мер содействия завершается этап воспроизводства молодых лесных насаждений. Покрытые лесом земли, по результатам лесовосстановления и/или лесоразведения соответствующие категории ценных лесных насаждений, подлежат лесовыращиванию – этапу ухода за лесом.

Стратегической целью ухода за лесом является выращивание созданных на этапах лесовосстановления и/или лесоразведения молодых лесов к возрасту спелости (климаксовая лесная экосистема) в статусе качественно ценных, прежде всего в части целевого породного состава и максимального наличного запаса, лесных насаждений – как объектов заготовки древесины и/или природоохранного назначения, в зависимости от установленной категории лесов.

Поддержание при лесовыращивании категории ценных лесных насаждений в условиях современной лесохозяйственной деятельности возможно только на путях целевого регулирования взаимоотношений между деревьями и другими организмами лесного биоценоза (из числа растений, животных, грибов, микроорганизмов и т. п.), а также с эдафо- и климатопом. Отсутствие или неправильное применение хозяйственного воздействия (мер ухода за лесом) влекут за собой негативные последствия взаимоотношений организмов и среды произрастания/местообитания лесной экосистемы, приводят к формированию малоценных и/или низкопродуктивных древостоев.

Стратегический план развития лесохозяйственной отрасли на период с 2015 по 2030 гг. [1] предусматривает оптимизацию видовой структуры лесов, увеличение доли молодняков, повышение продуктивности лесов, в том числе за счет лесоводственных рубок ухода в молодняках. Реализация этих мероприятий требует улучшения, не исключая новых подходов. Достижение отдельных показателей по состоянию на 2020 г. не обеспечивается. В частности, по состоянию на 01.01.2020 [2] доля насаждений с преобладанием сосны составляет 49,2% (план на 2020 год – 53%), доля молодняков – 17,7% (план – 23%), годичная абсорбция углекислого газа лесным фондом – 25 млн т CO_2/год (план – 47) и др. Негативные погодно-климатические последствия сказались на отвлечении средств и ресурсов для ликвидации экстремальных нарушений лесных экосистем. По этим причинам, также с учетом достижения установленных целей устойчивого развития Беларуси (2015–2030 гг.) [3], глобальных целей Стратегического плана ООН по лесам (2017–2030 гг.) [4], обязательств по Парижскому климатическому соглашению и др., возникла необходимость корректировки и поиска новых подходов в вопросах лесовыращивания, ухода за лесом.

Традиционно уход за лесом ведется, за редким исключением, за высоко-, реже среднеполнотными насаждениями главных пород (сосна, ель, твердолиственные). Малоценные и низкополнотные насаждения главных пород в части ухода подвергаются лесозащитным мероприятиям, иногда реконструктивным. Преобладающие среди уходов за лесом рубки ухода планируются по нормативным требованиям (недостаточные полноты). По экспертной оценке, около половины покрытых лесом земель находятся вне сферы хозяйственного воздействия. Такие насаждения являются малоценными из-за преобладания второстепенных пород и низкопродуктивными из-за недостаточной полноты древостоев. Отраслевые ТНПА, по существу, не предусматривают активных мер по улучшению породной и полнотной структуры этих насаждений [5–10].

Основная часть. Погодно-климатические условия последних лет (засухи, ураганные ветры и др.), вызвавшие массовое усыхание лесов, проявление буреломов и ветровалов, отдельные недостатки лесохозяйственной деятельности способствуют снижению показателей качества выращиваемых насаждений к возрасту главной рубки. Приведем отдельные примеры в указанном отношении.

Доля площади покрытых лесом земель по преобладающим породам в возрастных группах составляет в процентах: среди молодняков – хвойные и твердолиственные – 70,5, мягколиственные – 29,5; среди средневозрастных – хвойные и твердолиственные – 58,5, мягколиственные – 41,5; среди приспевающих – хвойные и твердолиственные – 70,1, мягколиственные – 29,9; среди спелых – хвойные и твердолиственные – 52,9, мягколиственные – 47,1. Заметна тенденция увеличения доли малоценных мягколиственных древостоев от молодняков к спелым (данные Государственного лесного кадастра Республики Беларусь по состоянию на 01.01.2020) [2].

Сравнительная динамика доли хвойных насаждений в общей площади покрытых лесом земель представлена в табл. 1 (по данным Государственных учетов лесного фонда Республики Беларусь).

Таблица 1

Динамика долевого участия хвойных насаждений в составе покрытых лесом земель Республики Беларусь

Год учета	Общая площадь покрытых лесом земель, тыс. га	Долевое участие хвойных насаждений, %
1966	4832,7	65,4
1973	5352,3	67,7
1978	5727,5	69,0
1983	5895,9	68,8
1988	6001,0	68,7
1994	7370,3	66,2
2001	7844,9	60,3
2006	7835,1	59,8
2011	8045,9	59,5
2016	8167,6	59,9
2020	8220,1	59,0

При оценке этой информации сошлемся на рекомендации ученых и нормативные документы. Предложения И. Д. Юркевича, А. Д. Янушко, В. Е. Ермакова, В. Ф. Багинского, Л. Н. Рожкова и других ученых в части оптимального участия хвойных насаждений в лесном фонде Беларуси составляют от 66 до 70% [11]. Стратегический план развития лесного хозяйства Беларуси на период до 2015 г. [12] рекомендовал долю хвойных 67,94%, Стратегический план на период 2015–2030 гг. [1] скорректировал этот показатель до 62,7%. Заметно, что реальная ситуация отличается от указанных рекомендаций.

Максимальное участие хвойных (69,0 %) имело место по состоянию на 01.01.1978, минимальное (59,0%) – на 01.01.2020 [2]. Можно утверждать,что в 70–90-е гг. XX в. имела место оптимальная формационная структура лесного фонда. Последние тридцать лет (с 1990 г.) наблюдается односторонний тренд – сокращение доли хвойных лесов, что позволяет говорить о периоде ухудшения формационной структуры лесов Беларуси. Сегодня доля хвойных на 3,7 п. п. ниже рекомендаций Стратегического плана на 2030 г. [2] и на 9,0 п. п. рекомендаций [11, 12]. Крайне важно установить причины происходящего.

Как первый этап анализа, ожидаемо обратить внимание на воспроизводство лесов (лесовосстановление и лесоразведение), в частности, на его итоговое мероприятие – перевод несомкнувшихся лесных культур и естественного возобновления леса в покрытые лесом земли (категорию ценных лесных насаждений).

За последние два десятилетия доля хвойных среди площадей, переведенных в покрытые лесом земли, составила в среднем 71,3%, твердолиственных – 6,1% и мягколиственных – 22,6%. Это высокий показатель. Следовательно, видовой состав создаваемых молодых лесов оптимален и не является причиной вышеустановленной динамики сокращения долевого участия хвойных насаждений в лесном фонде.

Следующий этап касается анализа лесоводственного ухода за молодняками. Касательно формирования состава молодых насаждений это задача в первую очередь осветлений (включая возраст 10 лет) и прочисток (11–20 лет). С учетом того, что перевод лесных культур и естественного возобновления осуществляется в возрасте ≈8 лет, насаждения до 20 лет могут быть охвачены тремя приемами лесоводственного ухода: осветлением – одним, и прочисткой – двумя приемами. Результаты лесоводственных уходов сформируют породную структуру 20-летних насаждений. Последние представлены молодняками I класса возраста хвойных и твердолиственных и молодняками I–II классов возраста мягколиственных пород. Состав 20-летних насаждений по группам пород в разрезе периодов Государственных учетов лесов представлен в табл. 2.

Анализ табл. 2 свидетельствует, что за первые 15–20 лет после перевода в покрытые лесом земли среди 20-летних насаждений возросла вдвое площадь мягколиственных (менее ценных) и сократилась на четверть площадь хвойных и твердолиственных (более ценных) насаждений. Это средний за более чем полувековой период показатель, объективно зафиксированный государственной статистикой.

Установлен первый фактор потери качества формационной ценности лесных насаждений Беларуси. Это результат низкой лесоводственной эффективности уходов за лесом. Предположительно речь может идти о качестве или проведении/непроведении осветлений, прочисток, реконструкции, санитарно-оздоровительных мероприятий и др. Необходимы специальные фундаментальные научные исследования для установления роли каждого мероприятия.

Таблица 2

Состав 20-летних насаждений по группам пород

Год учета	Всего 20-летних насаждений		В том числе распределение по группам пород, %		
	тыс. га	%	хвойных	твердолиственных	мягколиственных
1966	1927,0	100,0	58,6	4,4	37,0
1973	2002,1	100,0	62,4	4,7	32,9
1978	1943,8	100,0	65,1	4,4	30,5
1983	1667,2	100,0	64,2	3,5	32,3
1988	1332,8	100,0	63,3	3,9	32,8
1994	1108,1	100,0	48,0	3,1	48,9
2001	1018,1	100,0	36,5	3,1	60,4
2006	937,1	100,0	34,0	3,1	62,9
2011	950,8	100,0	39,8	3,5	56,7
2015	1025,1	100,0	44,1	3,7	52,2
2020	905,6	100,0	48,1	4,4	47,5
В среднем за 1966–2020 гг.			54,3	4,2	41,5

Таблица 3

Динамика долевого участия хвойных пород за 20-летний период роста тождественно исходной группе насаждений

Исходный год учета группы насаждений	Долевое участие хвойных насаждений в составе насаждений всех пород этой группы, %	
	≈8–20 лет	21–40 лет
1966	58,6	57,3
1973	62,4	51,7
1978	65,1	47,5
1983	64,2	39,2
1988	63,3	32,7
1994	48,0	27,5
2001	36,5	28,3
В среднем	58,5	30,9

Полувековая (1966–2020 гг.) база данных учета лесов позволяет отследить, с определенной степенью тождественности, изменения породного состава насаждений за 40-летний период их роста. Анализу подвергнуты группы насаждений возрастом ≈8–20 лет и они же, перешедшие в возрастную группу 21–40 лет (табл. 3).

Как видим, выращивание насаждений возрастной группы 21–40 лет, как и в случае с возрастом до 20 лет, сопровождается сокращением хвойных в пользу мягколиственных насаждений. Это неожиданный вывод, поскольку в 20-летнем возрасте ожидаемо завершение формирования состава насаждений. Прореживания в хвойных, прореживания и проходные рубки в мягколиственных насаждениях не предполагают изменения состава. Установленный второй фактор негативного воздействия на качество формационной структуры лесов нуждается в объективной научной оценке причин его проявления.

Заключение. Качественно выполненное воспроизводство молодых лесов далеко не является гарантией получения ценных насаждений главных пород (сосны, ели, дуба и др.) в спелом возрасте. Уход за лесом в возрастной группе 8–40-летних насаждений по невыясненной причине не обеспечивает формирования оптимальной породной структуры лесов Беларуси.

Наблюдается устойчивая нежелательная тенденция сокращения хвойных насаждений в общей площади покрытых лесом земель. Проблема заслуживает глубокой научной оценки.

Необходим синергетический подход к мероприятиям по лесовыращиванию. Меры ухода за лесом (рубки ухода, реконструкция, выборочные санрубки, мероприятия по повышению продуктивности, уход за средой произрастания и др.) должны носить системный подход, выполняться в комплексе.

Текущими важнейшими стратегическими направлениями научно-технической и инновационной деятельности в области ухода за лесом являются:

– совершенствование лесоводственных уходов (осветления, прочистки) для сохранения уровня хорошего качества ценных лесных насаждений после их перевода в земли, покрытые лесом;

– разработка направлений по повышению качества насаждений 9–30-летнего возраста, по разным причинам оказавшихся среди малоценных и/или низко/среднеполнотных;

– оптимизация коммерческих (прореживания, проходные рубки) методов ухода за лесом по повышению устойчивости, продуктивности и целевого назначения средневозрастных насаждений в реальных погодно-климатических условиях;

– разработка программы формирования нормальных лесных насаждений на зонально-типологической основе с применением различных методов ухода;

– совершенствование нормативов ухода за лесом с учетом социально-экономических и природоохранных функций лесов.

Список литературы

1. Стратегический план развития лесохозяйственной отрасли на период с 2015 по 2030 годы: утв. 23.12.2014. Минск, 2015. 20 с.

2. Государственный лесной кадастр Республики Беларусь по состоянию на 01.01.2020. Минск, 2020. 64 с.

3. Цели устойчивого развития Беларуси. Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2019. 30 с.

4. UNSPF – Стратегический план в отношении лесов Организации Объединенных Наций на период 2017–2030 годов. URL: https://undocs.org/pdf/RES/2017 (дата обращения: 18.10.2019).

5. Вайс А. А. Современные исследования в области рубок ухода [Электронный ресурс] // Исследования в области естественных наук. 2015. № 6. URL: http://science.snauka.ru/2015/06/10202 (дата обращения: 07.03.2019).

6. Добровольский А. А. Шведский опыт рубок ухода за лесом // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2007. № 12. С. 37–42.

7. Правила рубок леса в Республике Беларусь от 19.12.2016 с изменениями и дополнениями (утв. постан. Мин. лесн. хоз. от 23.07.2018 г. № 14). URL: https://bii.by/tx.dll?d=334573&a=1 (дата обращения: 07.07.2019)

8. Лабоха К. В., Борко А. Ч. Преобразование рубками ухода производных березняков Белорусского Поозерья в коренные лесные формации // Труды БГТУ. 2016. № 1: Лесное хоз-во. С. 38–41.

9. Левковская М. В., Сарнацкий В. В. Влияние лесозаготовительной техники на живой напочвенный покров и некоторые свойства почв сосняков орляковых в результате проведенных проходных рубок // Труды БГТУ. 2016. № 1: Лесное хоз-во. С. 42–46.

10. Юшкевич М. В. Составы древостоев, сохраняющих высокую устойчивость к рекреации и обладающие привлекательностью для отдыхающих // Труды БГТУ. 2015. № 1: Лесное хоз-во. С. 115–118.

11. Рожков Л. Н. Основы теории и практики рекреационного лесоводства. Минск: БГТУ, 2001. 292 с.

12. Стратегический план развития лесного хозяйства Беларуси. Минск: Минлесхоз,1997. 178 с.

References

1. *Strategicheskiy plan razvitiya lesokhozyaystvennoy otrasli na period s 2015 po 2030 gody* [The strategic plan for the development of the forestry sector for the period from 2015 to 2030]. Minsk, 2015. 20 p.

2. *Gosudarstvennyy lesnoy kadastr Respubliki Belarus' po sostoyaniyu na 01.01.2020* [The State Forest Cadastre of the Republic of Belarus as of 01.01.2020]. Minsk, 2020. 64 p.

3. *Tseli ustoychivogo razvitiya Belarusi.* [The goals of sustainable development of Belarus]. Minsk, National Statistical Committee of the Republic of Belarus Publ., 2019. 30 p.

4. UNSPF – United Nations Forest Strategic Plan for the period 2017-2030. URL: https://undocs.org/pdf/RES/2017 (accessed 18.10.2019).

5. Vais A. A. Modern research in the field of thinning. *Issledovaniya v oblasti estestvennykh nauk* [Research in the field of natural sciences], 2015, no. 6. Available at: http://science.snauka.ru/2015/06/10202 (accessed 07.03. 2020).

6. Dobrovolsky A. A. The Swedish experience of thinning forest care. *Izv. S.-Peterb. lesotekhn. akad.* [News of the St. Petersburg Forest Technical Academy]. 2007, no. 12. pp. 37–42 (In Russian).

7. *Pravila rubok lesa v Respublike Belarus' ot 19.12.2016* [The rules of forest felling in the Republic of Belarus dated December 19, 2016]. URL: https://bii.by/tx.dll?d=334573&a=1 (accessed 07.07.2019)

8. Labokha K. V., Borko A. Ch. Conversion of nursing birch forests of the Belarusian Lake District into thin forest formations by thinning. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 1: Forestry, pp. 38–41 (In Russian).

9. Levkovskaya M. V., Sarnatsky V. V. The influence of forestry equipment on live soil cover and some soil properties of bracken pine forests as a result of through felling. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 1: Forestry, pp. 42–46 (In Russian).

10. Yushkevich M. V. Compositions of stands that retain high resistance to recreation and are attractive for vacationers. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 1: Forestry, pp. 115–118 (In Russian).

11. Rozhkov L. N. *Osnovy teorii i praktiki rekreatsionnogo lesovodstva* [Fundamentals of the theory and practice of recreational forestry]. Minsk, BSTU Publ., 2001. 292 p.

12. *Strategicheskiy plan razvitiya lesnogo hozyaystva v Belarusi* [The strategic plan for the development of forestry in Belarus.] Minsk, Ministry of Forestry Publ., 1997. 178 p.

Информация об авторе

Рожков Леонид Николаевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры лесоводства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: rozhkov@belstu.by

Information about the author

Rozhkov Leonid Nikolaevich – DSc (Agriculture), Professor, Professor of the Department of Silviculture. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova St., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rozhkov@belstu.by

Поступила 24.01.2020

УДК 630*161.32:630*907.3

Л. Н. Рожков
Белорусский государственный технологический университет

ГОДИЧНАЯ АБСОРБЦИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ В СВЯЗИ С ВОЗРАСТОМ

Рассматривается проблема отношения к старовозрастным лесам в процессе лесопользования. Объектами исследования явились: сосняки Негорельского лесничества, в течение 67-летнего периода используемые в природоохранном режиме; сосняки заповедной зоны Беловежской пущи. Установлены для сосновых древостоев в связи с возрастом средние запасы, содержание углерода, среднее изменение депонирования углерода и годичная абсорбция углекислого газа сосновыми древостоями. Отмечено, что наибольшей интенсивностью «стока» CO_2 обладают сосновые древостои второго-пятого классов возраста. В седьмом и старше классах возрастов сосновые древостои становятся источником «эмиссии» углекислого газа. Обсуждается свойство лесов секвестрировать органический углерод в почве. В условиях перехода значительных площадей сосновых насаждений Беларуси в спелые и увеличения при этом объемов заготовки древесины важно правильно учесть эколого-экономические интересы лесопользования и исключительную роль лесов в поглощении атмосферного углекислого газа.

Ключевые слова: старовозрастные леса, депонирование углерода лесами в связи с возрастом, годичная абсорбция CO_2 лесами.

L. N. Rozhkov
Belarusian State Technological University

ANNUAL AGE-RELATED ABSORPTION OF CARBON DIOXIDE BY PINE STANDS

The paper focuses on the issue of attitude to old forests in the process of forest use. The objects of research were pine stands of Negoreloye forestry station which have been conservation forests for 67 years and pine forests of Belovezhskaya Pushcha. The following age-related values have been established for the old pine forests: average stock, carbon content, average change of carbon sequestration and annual absorption of carbon dioxide. It has been noted that pine stands of age classes 2-5 have the largest CO_2 "stock" capacity. Those of age classes 6 and 7 have become sources of carbon dioxide emission. The paper considers the carbon sequestration capacity of forests. Considerable areas of pine forests in Belarus are currently transferring into mature forests and timber harvest volumes are increasing, therefore it is important to take account of environmental and economic interests of forest use and the exception role of forests in carbon dioxide absorption.

Key words: old forests, age-related carbon sequestration, annual CO_2 absorption by forests.

Введение. На двадцать четвертой сессии Конференции РКИК ООН об изменении климата (Катовице, Польша, 2–14 декабря 2018 г.) в очередной раз подтверждено, что леса являются ключевым компонентом для достижения целей Парижского климатического соглашения, играют решающую роль в депонировании и хранении углерода в почве, деревьях и другой растительности, а также в предоставлении товаров, ресурсов и материалов с меньшим углеродным следом [1].

В фитомассе лесов планеты связано 296 млрд т С-эквивалента углерода, что составляет 52,2% от его массы в атмосфере [2]. Это свидетельствует об исключительной миссии лесов – секвестрации и выводе из планетарного биокруговорота атмосферного диоксида углерода.

Но последние 25 лет углеродосеквестрационная функция лесов планеты оказалась практически исчерпанной. Годичная абсорбция углекислого газа лесами планеты за 1990–2015 гг. составляла в среднем 0,18 т CO_2/га/год. К примеру, по нашим исследованиям годичная абсорбция лесов Беларуси составляет 4,91 т CO_2/га/год, т. е. в 27 раз больше [3].

Леса являются объектом заготовки древесины, главным образом посредством рубки в возрасте спелости. Спелость по максимальному депонированию углерода соответствуют экономической спелости леса, возрасты рубки которой еще не установлены [4]. В настоящее время в Беларуси для расчетов возраста рубки В. Ф. Багинским и О. В. Лапицкой [4, с. 116] предложены возрасты экологической спелости древостоев Беларуси. Вычисленные возрасты

экологической спелости примерно на класс возраста выше возраста рубки в эксплуатационных лесах и соответствуют возрастам рубки в других категориях, таких как защитные и т. д. [4, с. 117].

Изложенное выше обращает внимание на дискуссионную проблему оценки годичной абсорбции углекислого газа старовозрастными лесами в сравнении с молодняками, средневозрастными и т. п.

Исследования, проведенные в университете Бирмингема [5], показывают, что более половины поглотителей углерода в лесах мира находятся в районах, где деревья относительно молоды – возрастом до 140 лет.

Л. Поортер из Вагенингенского университета (Нидерланды) по материалам исследования лесов в нетропических районах Южной и Центральной Америки отметил, что вторичные леса обладают огромным потенциалом с точки зрения поглощения углерода: «Один гектар таких лесов может поглощать до трех тонн углерода ежегодно. Это в 11 раз больше, чем поглощает обычный старовозрастный лес. Но леса выполняют самые различные функции. Старовозрастные леса полезны, поскольку удерживают большие объемы углерода, а молодые – тем, что активнее поглощают атмосферный углерод» [6].

Из материалов статьи «Европейские леса стареют и теряют способность эффективно поглощать углекислый газ», опубликованной в журнале «Nature Climate Change», следует: «Примерно треть европейских лесов составляют крайне дряхлые и пожилые деревья, что мешает им эффективно поглощать “лишний” CO_2 в атмосфере и фиксировать его в виде дополнительной биомассы. Это говорит о необходимости пересмотра их вклада в замедление глобального потепления в климатических моделях. Дальнейшее старение европейских лесов приведет к еще более значительному ухудшению их способности по замедлению глобального потепления» [7].

В противоположность этому исследования группы специалистов в старовозрастных лесах на юге Китая показали, что эти леса способны с большой скоростью поглощать углекислый газ из атмосферы за счет накопления органического вещества в поверхностных горизонтах почвы. За период с 1979 по 2003 гг. в почве этих лесов происходило накопление углерода в среднем 0,61 т С/га/год [8].

По оценке [9] леса возрастом 200 лет и старше ежегодно поглощают в среднем (2,4 ± 0,8) т С/га/год. Разработанная авторами [9] модель показывает, что старовозрастные леса ежегодно аккумулируют (0,4 ± 0,1) т С/га/год в стволовой биомассе и (0,7 ± 0,2) т С/га/год в грубом древесном опаде. Это означает, что примерно (1,3 ± 0,8) т С/га/год секвестрированного углерода приходится на корни и органическое вещество почвы.

Текущий прирост углерода стволовой древесины у нормальных сосновых древостоев с учетом класса бонитета при модальной полноте из данных В. Ф. Багинского и О. В. Лапицкой [4, табл. 26 и 27] составляет по классам возраста, т С/га/год: I – 0,83, II – 2,29, III – 2,70, IV – 2,30, V – 1,71, VI – 1,19, VII – 0,87, VIII – 0,78, IX – 0,67, X – 0,53 и >X – 0,38.

Основная часть. Объектами исследования явились сосновые древостои природоохранного режима лесопользования Негорельского учебно-опытного лесхоза БГТУ [10] и старовозрастные сосняки Беловежской пущи [11]. По материалам лесоустройства установлены возраст, природный состав, средний запас древостоев. На основе утвержденной для лесов Беларуси методики [12] выполнены для фитомассы древостоев (ствол + сучья и ветви + хвоя + пень и корни) расчеты содержания углерода, среднего изменения депонированного углерода и годичной абсорбции углекислого газа (таблица).

Естественная эволюция (1947–2014 гг.) сосновой формации Негорельского лесничества площадью 174,0 га отличается устойчивым трендом повышения среднего запаса (+154%), заметным снижением среднего прироста древесного запаса у древостоев конца пятого и старше классов возраста, появлением возобновления (подроста) сосны и ели у древостоев III–IX классов возраста (50,9% занимаемой ими площади) без формирования ярусов.

Сосновые насаждения заповедной зоны Беловежской пущи занимают 53,3% (28 968,6 га) площади зоны. Средний возраст сосновых древостоев – 140 лет, средняя полнота – 0,63, средний состав по первому ярусу – 8,4С0,93Е0,7Бб+Д, Ос, Бп, Олч, Г, Лп, Я, Кл. Более 20% сосновых насаждений являются двухъярусными. Средний состав второго яруса – 8,8Е1,2Г+С,Д, Бб, Олч, Ос, Лп, Бп, Я, Кл, средний возраст – 66 лет, средняя полнота – 0,32.

Среди анализируемых 5529 таксационных выделов сосны представлены в I–III классах возраста 2,1% их количества, IV – 26,2%, V – 5,1%, VI – 4,2%, VII – 6,6%, VIII – 10,1%, IX – 17,0%, X – 11,5%, XI – 5,7% и т. д.

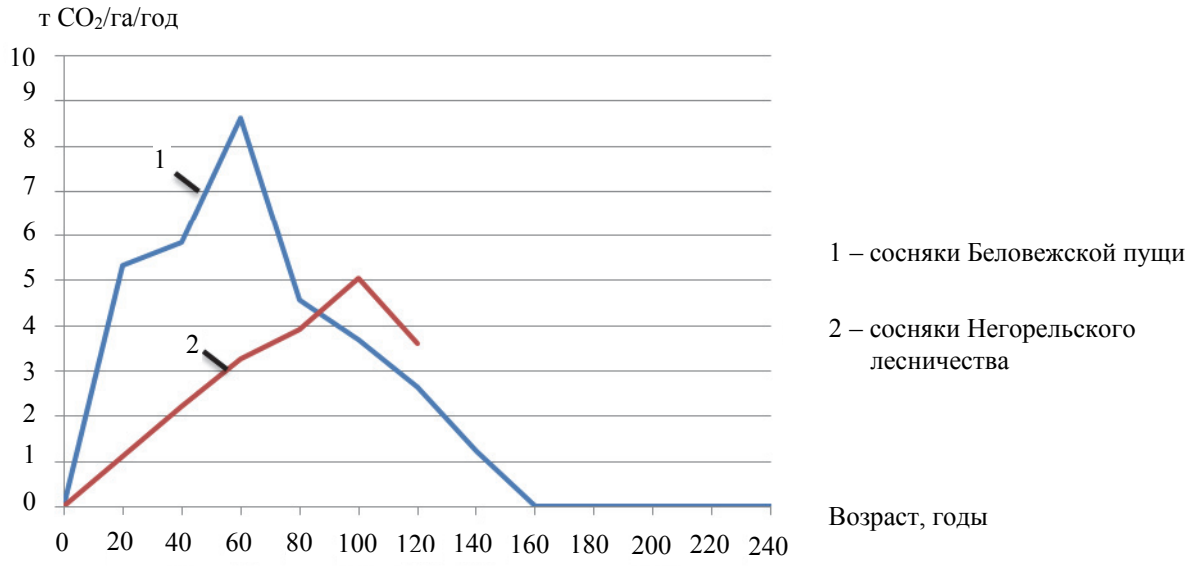
В лесах заповедной зоны наблюдается широкомасштабная агрессивная экспансия *Picea abies*. На 67,3% площади сосняков имеется еловый подрост, на 21,8% площади сформировался второй ярус из ели.

Углеродопродуктивность сосновых древостоев в связи с возрастом

Средний возраст в пределах классов возраста, лет	Средний запас, $м^3$/га	Углерод фитомассы древостоя, т С/га	Среднее изменение депонирования углерода древостоем, т С/га/год	Годичная абсорбция углекислого газа древостоем, т CO_2/га/год
Сосняки природоохранного режима Негорельского лесничества				
56	133	50,01	0,89	3,27
77	235	88,36	1,15	3,91
92	312	117,31	1,28	5,05
101	338	127,09	1,26	3,59
Сосняки заповедной зоны ГПУ НП «Беловежская пуща»				
13	50	18,8	1,45	5,32
34	139	52,3	1,54	5,85
57	283	130,9	2,30	8,62
76	451	157,6	2,03	4,57
92	467	173,7	1,89	3,69
113	509	188,8	1,67	2,64
136	529	196,4	1,44	1,21
156	541	200,7	1,29	–0,03
176	532	196,1	1,11	–0,03
194	530	195,1	1,00	–0,02
214	533	194,8	0,91	–0,02
232	526	194,4	0,84	–0,01

В таблице представлены показатели углеродопродуктивности сосновых древостоев. Показатели сосновых древостоев включают как сосновый, так и еловый элементы леса (ярусы) при их наличии. Древостои сосновых насаждений увеличивают депонирование углерода с возрастом (I класс – 18,8, XII класс – 194,4 т С/га). Темпы депонирования углерода древостоем, как среднее изменение, достигают своего пика примерно к четвертому классу, заметно снижаясь в восьмом и последующих классах возраста.

В текущей погодно-климатической ситуации наибольший интерес представляет масса диоксида углерода, связываемого и выводимого из атмосферы непрерывно и повседневно. Применительно к роли леса в этом процессе речь идет о годичной абсорбции углекислого газа как разности между усвоением атмосферного CO_2 при фотосинтезе древостоя и эмиссией CO_2 при дыхании живых деревьев и минерализации древесного отпада и опада. Возрастная динамика годичной абсорбции углекислого газа анализируемых сосновых древостоев представлена на рисунке.



Динамика годичной абсорбции CO_2 древостоями сосняков

Как видно, наибольшей интенсивностью «стока» CO_2 обладают сосновые древостои II–V классов возраста. В седьмом и старше классах возрастов сосновые древостои становятся источником «эмиссии» углекислого газа.

Как ранее отмечалось, многие исследователи обращают внимание на повышенную секвестрационную функцию старовозрастных лесов. Согласно данным [8, 9], секвестрация органического углерода в почве старовозрастных лесов может быть эквивалентна их годичной абсорбции порядка 2,24–4,77 т CO_2/га/год. Это важный аргумент в пользу сохранения старовозрастных лесов в качестве источников поглощения углекислого газа при учете баланса интересов древесинопользования и экологической функции лесов.

Для справедливости следует отметить, что секвестрация органического углерода в почве характерна для лесов всех возрастов. Наши исследования в зеленомошных приспевающих сосновых и еловых древостоях свидетельствуют о секвестрации до 0,68 т С-эквивалента, что соответствует годичной абсорбции до 2,49 т CO_2/га/год. Вопрос о секвестрации углерода лесами в почве и лесной подстилке является актуальным и заслуживает большего внимания в целях исследования.

Заключение. Широкомасштабные работы по лесовосстановлению в первые послевоенные годы стали результатом текущего вступления в сферу главного пользования значительных объемов лесов. При действующих возрастах главной рубки расчетная лесосека может возрасти в два и более раза. Погодно-климатическая ситуация диктует необходимость сохранения достигнутого высокого уровня годичной абсорбции углекислого газа лесами Беларуси в связи с невысокими объемами заготовки древесины в условиях недостатка спелых и преобладания средневозрастных и приспевающих лесов. Увеличение объемов заготовки древесины значительно уменьшит поглощение углекислого газа лесами Беларуси. Отказ от главной рубки в пользу сохранения старовозрастных лесов нуждается в серьезном объективном доказательстве, к чему недостаточно подготовлена сегодня лесная наука и экономика.

Материалы данного исследования будут полезны при учете баланса интересов эколого-экономического лесопользования.

Список литературы

1. United nations climate chance conference. Cop. 24. Katowice, 2018, 3 p.

2. Филипчук А. Н., Моисеев Б. Н., Медведева М. А., Кинигопуло П. С. Сравнительная характеристика лесов и ведения лесного хозяйства в разных странах // Лесохоз. информ. 2015. № 3. С. 56–69

3. Лесоуглеродный ресурс Беларуси / Л. Н. Рожков [и др.]; под общ. ред. Л. Н. Рожкова, И. В. Войтова, А. А. Кулика. Минск: БГТУ, 2018. 83 с.

4. Багинский В. В., Лапицкая О. В. Влияние возрастной структуры на поглощение лесами углекислого газа // Лесоуглеродный ресурс Беларуси / Л. Н. Рожков [и др.]. Минск: БГТУ, 2018. С. 88–124.

5. Молодые леса лучше всего поглощают углекислый газ. URL: https://ab–news.ru (дата обращения: 01.03.2019).

6. Книга о лесе и лесоводстве. URL: www.dendrology.ru (дата обращения: 01.03.2019).

7. АГРО-XXI агропромышленный портал. URL: www.agroxxi.ru. (дата обращения: 01.03.2019).

8. Old Growth Forests Can Accumulate Carbon in Soils / Goyi Zhou [et al.] // Science. 2006. Vol. 314, No. 5804. P. 1417.

9. Старовозрастные леса как глобальной сток углерода / С. Луиссаар [и др.] // Устойчивое лесопользование. 2018. № 4 (68) . С. 32–35.

10. Рожков Л. Н. Старовозрастные сосняки: как сохранить // Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. тр. Вып. 41. Брянск: БГИТА, 2015. С. 71–76.

11. Рожков Л. Н. Старовозрастные сосняки Беловежской пущи: состояние, перспективы сохранения // Труды БГТУ. Серия 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2017. № 1. С. 14–17.

12. Методика оценки годичных потоков «стока-эмиссии» углекислого газа и общего депонирования углерода лесами Республики Беларусь: утв. и введ. в действие приказом М-ва лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 28.03.2011. № 81 / Л. Н. Рожков [и др.]. Минск: БГТУ, ЛРУП «Белгослес», 2011. С. 19.

References

1. United nations climate chance conference. Cop 24. Katowice, 2018. 3 p.

2. Filipchuk A. N., Moiseev B. N., Medvedeva M. A., Kinigopulo P. S. Comparative characteristics of forests and forestry in different countries. *Lesokhozyastvennaya informatsiya* [Forestry information], 2015, no. 3, pp. 56–69 (In Russian).

3. Rozhkov L. N. [et al.] *Lesouglerodnyy resurs Belarusi* [Forest carbon resource of Belarus]. Minsk, BSTU Publ., 2018. 247 p.

4. Baginsky V. V., Lapitskaya O. V. Influence of the age structure on the absorption of carbon dioxide by forests. *Lesouglerodnyy resurs Belarusi* [Forest carbon resource of Belarus]. Minsk, BSTU Publ., 2018, pp. 88–124 (In Russian).

5. *Molodye lesa luchshe vsego pogloshchayut uglekislyy gaz* [Young forests absorb carbon dioxide best]. Available at: https://ab–news.ru (accessed 03.01.2019).

6. *Kniga o lese i lesovodstve* [A book on forestry and forestry]. Available at: www.dendrology.ru (accessed 03.01.2019).

7. *AGRO-XXI agropromyshlennyy portal* [AGRO-XXI agricultural portal]. Available at: www.agroxxi.ru (accessed 03.01.2019).

8. Goyi Zhou, Schuguang Liu, Zhian Li [et al.]. Old Growth Forests Can Accumulate Carbon in Soils. *Science*, 2006, vol. 314, no. 5804, p. 1417.

9. Luissaar S., Schulz I., Berner A. [et al.] Old-growth forests as a global carbon sink. *Ustoychivoe lesopol'zovanie* [Sustainable forest management], 2018, no. 4 (68), pp. 32–35 (In Russian).

10. Rozhkov L. N. Old-aged pine trees: how to save. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], vol. 41. Bryansk, BGITA Publ., 2015. Pp. 71–76 (In Russian).

11. Rozhkov L. N. Old-aged pine forests of the Bialowieza Forest: state, conservation prospects. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forestry, Nature Management and Processing of Renewable Resources, 2017, no. 1, pp. 14–17 (In Russian).

12. Rozhkov L. N. [et al.] *Metodika otsenki godichnykh potokov "stoka-emissii" uglekislogo gaza i obshchego deponirovaniya ugleroda lesami Respubliki Belarus'* [Methodology for assessing annual flows of carbon dioxide "sink-emission" and total carbon deposition by forests of the Republic of Belarus]. Minsk, BSTU Publ., LRUP Belgosles Publ., 2011. P. 19.

Информация об авторе

Рожков Леонид Николаевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры лесоводства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: rozhkov@belstu.by

Information about the author

Rozhkov Leonid Nikolaevich – DSc (Agriculture), Professor, Professor of the Department of Silviculture. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rozhkov@belstu.by

Поступила 24.01.2020

ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЕ И ЛЕСОВОЗВЕДЕНИЕ

УДК 630*181.31:630*228.3

А. А. Беспалый, И. В. Соколовский
Белорусский государственный технологический университет

ДИНАМИКА РАСТИТЕЛЬНОСТИ В ДУБРАВАХ ОЛЬХОВО-ПОЙМЕННОЙ И ОРЛЯКОВОЙ БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПОЙМЕННОГО И ПОЧВЕННО-ГРУНТОВОГО ВОДНОГО РЕЖИМОВ

Приведены данные 45-летних наблюдений за изменением состава растительности в дубраве ольхово-пойменной и дубраве орляковой, произрастающих на дерновой глееватой суглинистой пойменной и дерново-подзолистой временно избыточно увлажняемой супесчаной почвах. Показана динамика растительности в различных ярусах с возрастом и с увеличением обводненности и проявления застойного увлажнения, которое произошло в результате строительства дамбы и автомобильной дороги. В ольхово-пойменной дубраве полнота насаждения снизилась с 1,0 до 0,4 из-за выпадения из насаждения прежде всего дуба черешчатого. В дубраве орляковой также снизилась полнота насаждения, и из-за повышения увлажнения и изменения растительности в различных ярусах в настоящее время она классифицируется как дубрава черничная.

В других ярусах насаждений появляются влаголюбивые растения, в том числе которые произрастают при застойном увлажнении.

Ключевые слова: дуб черешчатый, береза бородавчатая, ольха черная, ясень обыкновенный, стационарная пробная площадь, подрост, подлесок, состав, гидрологический режим, застойное увлажнение, продуктивность, почва.

A. A. Bespalyy, I. V. Sokolovskiy
Belarusian State Technological University

VEGETATION DYNAMICS IN THE OAKS OF ALDER-FLOODPLAIN AND ORLYAKOVA BELARUSIAN POLESIE WHEN CHANGING THE FLOODPLAIN AND SOIL-GROUND WATER REGIMES

The data of 45 years of observing change in the composition of vegetation in the alder groveriparian and oak ilakovac grown in the sod are predominant supine wait floodplain and sod-podzolic temporarily excessively wetted soils. The dynamics of vegetation in different tiers with age is shown, including an increase in waterlogging and the manifestation of stagnant moisture, which occurred as a result of the construction of a dam and a highway. In the alder-floodplain oak forest, the fullness of the plantings decreased from 1.0 to 0.4 due to the fallout from the plantings, primarily of the petiolate oak. In orlyakova oak grove, the fullness of planting has also decreased, and due to increased moisture and changes in vegetation in various tiers, it is now classified as blueberry oak.

In other tiers of plantings, moisture-loving plants appear, including those that grow with stagnant moisture.

Key words: petiolate oak, warty birch, black alder, common ash, stationary trial area, undergrowth, undergrowth, composition, hydrological regime, long-term moisture, productivity, soil.

Введение. Дубравы Белорусского Полесья характеризуются разнообразным видовым составом растительности во всех ярусах, что определяется плодородием почвы (строение почвенного профиля, гранулометрический и химический состав, содержание гумуса, реакция среды, водный режим), возрастом и густотой насаждения. Изменение гидрологического режима территории (осушение болот, строительство дамб и дорог, спрямление русел рек) определило изменение водного режима и агрохимических свойств почв, что способствует

изменению условий произрастания дуба и его спутников, видового состава растительности в других ярусах дубрав [1–6].

Основная часть. В суходольной и пойменной дубравах, не подвергшихся рубкам с 1970-х гг. годов, проводились исследования на стационарных пробных площадях (СПП) с целью их мониторинга. В работе приведены данные по изменению (основной полог, подрост, подлесок) в дубраве ольхово-пойменной (СПП 1) и дубраве орляковой (СПП 2) [7], произрастающих на территории ГПУ «НП «Припятский».

Исследуемые древостои на момент закладки пробных площадей представляли собой высокопродуктивные дубравы. В начале 1980-х гг. на границе лесного массива и сельскохозяйственных угодий была отсыпана дамба, расположенная в непосредственной близости от насаждения на СПП 1 (200–250 м) и ограждающая населенный пункт от паводка. Возле насаждения на СПП 2 в 1999 г. построена асфальтированная дорога. В обоих случаях произошло изменение поверхностного стока, что привело к формированию застойного увлажнения в почвах исследуемых насаждений.

Дубрава ольхово-пойменная на момент закладки СПП 1 в 1971 г. характеризовалась возрастом 100 лет. В составе насаждения 50% занимал дуб, 40% ольха черная, 10% береза повислая, в примеси встречались осина, граб и ясень, полнота насаждения была 1,0, что позволяло считать его как эталонное (табл. 1).

Дубрава произрастает на дерновой глееватой пойменной суглинистой почве, формирующейся на суглинке тяжелом аллювиальном, сменяемом с глубины 40–50 см песком связным аллювиальным. Гумусовый горизонт протяженностью 25–30 см содержит 6,5% гумуса, а актуальная кислотность pH = 5,3 [8].

Устройство дамбы в непосредственной близости от насаждения привело к изменению поемности, что привело к развитию процессов застойного увлажнения. Указанные изменения привели к нарушению биологической устойчивости дубравы, она начала усыхать, что особенно заметно по уменьшению запаса в период с 1992 по 2005 г. К 2017 г. в составе насаждения резко сократилась доля ольхи, полностью выпал из состава ясень. Полнота насаждений снизилась до 0,4, а запас древесины почти в 3 раза в сравнении с 1992 г. Этим объясняется увеличение участия в составе дуба, березы и осины (табл. 1).

Дубрава орляковая на момент закладки СПП 2 в 1971 г. характеризовалась возрастом 120 лет. В составе насаждения 80% занимал дуб, 20% береза, в примеси встречались сосна, полнота была 0,8. Дубрава произрастала на дерново-подзолистой временно избыточно увлажняемой супесчаной почве, формирующейся на супеси рыхлой древнеаллювиальной, сменяемой с глубины 60–70 см песком рыхлым древнеаллювиальным. В настоящее время почва классифицируется как дерново-подзолистая глееватая. Гумусовый горизонт 15–20 см содержит 2,5% гумуса, а реакция среды очень сильнокислая (pH = 3,7) [9–11].

В дубраве орляковой за 45-летний период наблюдений произошли изменения в составе и структуре фитоценоза. В возрасте 120–140 лет насаждение характеризовалось высокой полнотой, а в составе дуб черешчатый занимал 80% запаса. После строительства дороги произошло изменение водного режима, а в составе насаждения усохло много дуба, березы и полностью ольха черная.

За период наблюдения в насаждениях произошли существенные изменения в структуре и количестве подроста.

В дубраве ольхово-пойменной на момент начала наблюдений общее количество подроста составляло 12,4 тыс. шт./га, где преобладал подрост ясеня (5,5 тыс. шт./га) и дуба (5,4 тыс. шт./га), а в 2017 г. общее количество подроста составляет 2,3 тыс. шт./га, и доминирует подрост ясеня, в меньшем количестве представлены береза, граб и ольха черная. В насаждении полностью исчез подрост дуба (табл. 2).

Таблица 1

Динамика лесоводственно-таксационных показателей в насаждениях на пробных площадях

Год	Возраст, лет	Состав насаждения	Средние		Бонитет	Полнота	Запас, м^3/га	
			H, м	*D*, см			сыр.	сух.
СПП 1								
1971	100	5Д4Олч1Б+Ос ед. Г, Я	22,6	26,2	III	1,00	332	2
1992	121	5Д4Олч1Б+Я+Г ед. Ос	24,3	35,9	III	1,00	420	16
2017	146	6Д2Б1Олч1Ос+Г	26,0	48,4	III	0,40	183	10
СПП 2								
1971	120	8Д2Б ед. С	22,6	25,6	III	0,80	287	–
1992	141	8Д2Б+С ед. Г, Олч	25,6	41,1	III	0,92	371	28
2017	166	7Д1Б1С1Ос+Г	25,0	35,6	III	0,74	290	10

Таблица 2

Количество подроста на пробных площадях, тыс. шт./га

Год	Порода	Средняя высота, м						Всего
		0,1–0,2	0,2–0,5	0,5–1,0	1,0–1,5	1,5–2,5	>2,5	
СПП 1								
1971	Ясень обыкновенный	–	1,5	–	–	4,0	–	5,5
	Дуб черешчатый	3,6	–	1,8	–	–	–	5,4
	Береза бородавчатая	–	1,0	–	–	–	–	1,0
	Осина обыкновенная	–	–	0,5	–	–	–	0,5
1992	Ясень обыкновенный	–	–	1,0	0,3	0,7	–	2,0
	Береза бородавчатая	–	–	–	0,7	0,7	0,3	1,7
	Граб обыкновенный	0,3	–	–	–	–	–	0,3
	Осина обыкновенная	–	0,2	–	–	–	–	0,2
	Ольха черная	–	—	–	–	0,3	–	0,3
2017	Ясень обыкновенный	–	–	0,1	0,2	0,2	0,2	0,7
	Граб обыкновенный	–	–	–	0,2	0,2	–	0,4
	Береза бородавчатая	–	–	–	0,1	0,2	0,1	0,4
	Осина обыкновенная	–	–	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4
	Ольха черная	–	–	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4
СПП 2								
1971	Дуб черешчатый	–	4,0	–	–	–	–	4,0
	Береза бородавчатая	–	1,2	–	–	–	0,8	2,0
	Граб обыкновенный	–	–	–	0,6	–	–	0,6
	Осина обыкновенная	–	1,6	–	–	1,2	–	2,8
	Ольха черная	–	–	–	–	–	0,2	0,2
	Сосна обыкновенная	–	–	–	–	–	0,4	0,4
1992	Дуб черешчатый	4,2	2,2	2,4	1,2	–	–	10,0
	Граб обыкновенный	1,4	1,0	0,6	0,6	–	–	3,6
	Береза бородавчатая	0,8	1,0	0,6	0,5	0,5	–	3,4
	Ольха черная	–	–	–	1,0	0,7	–	1,7
	Сосна обыкновенная	–	0,2	0,2	–	–	–	0,4
2017	Осина обыкновенная	0,2	0,5	0,7	0,2	–	–	1,6
	Граб обыкновенный	–	–	–	0,5	0,4	–	0,9
	Сосна обыкновенная	–	–	–	0,1	–	–	0,1
	Дуб черешчатый	–	–	0,1	–	–	–	0,1
	Береза бородавчатая	–	–	0,1	0,2	0,1	–	0,4

В дубраве орляковой на начало исследований количество подроста было примерно на одном уровне с дубравой ольхово-пойменной. В возрасте 141 год количество подроста увеличилось почти в два раза без изменения породного состава, при этом преобладал дуб черешчатый в количестве 10 тыс. шт./га. Через 18 лет после прокладки дороги количество подроста составило 3,2 тыс. шт./га, а преобладающее положение заняла осина.

Подлесочный ярус (табл. 3) при закладке СПП 1 насчитывал 6,2 тыс. шт./га, где доминировала крушина ломкая (5,6 тыс. шт./га), произрастали бересклет европейский и лещина обыкновенная. В настоящее время произрастают крушина ломкая и ива козья, соответственно 0,5 и 0,4 тыс. шт./га. Следует отметить, что в подлеске остались только влаголюбивые растения, индикатором в данном случае выступает ива. Подлесок дубравы орляковой характеризуется достаточно большим видовым разнообразием и наибольшее распространение получили рябина и крушина. За период исследований в насаждении выпал полностью дрок красильный, а появились ива, калина, еживика сизая.

В живом напочвенном покрове дубравы орляковой сильное развитие за указанный промежуток времени получила черника. Обилие черники достигло 5 баллов. С учетом увеличения увлажнения почвы и изменения состава живого напочвенного покрова дубрава орляковая в настоящее время классифицируется как черничная. В составе живого напочвенного покрова появился по микрозападинам индикатор повышенного увлажнения кукушкин лен обыкновенный.

Таблица 3

Характеристика подлеска, тыс. шт./га

Порода	СПП 1			СПП 2		
	1971	1992	2017	1971	1992	2017
Дрок красильный	–	–	–	0,8	1,2	–
Рябина обыкновенная	–	–	–	4,0	5,2	1,4
Крушина ломкая	5,6	0,3	0,5	3,0	–	3,7
Ива	–	–	0,4	–	0,8	0,1
Яблоня лесная	–	–	–	1,0	–	0,1
Груша обыкновенная	–	–	–	–	1,6	0,1
Лещина обыкновенная	0,4	–	–	0,6	–	1,9
Ежевика сизая	–	–	–	–	–	6,2
Бересклет европейский	0,2	–	–	–	–	–
Смородина черная	–	0,7	–	–	–	–
Калина	–	–	–	–	–	0,4
Всего	6,2	1,0	0,9	9,4	8,8	13,9

Заключение. Изменение гидрологического режима почвы приводит в действие механизмы адаптации растений к новым условиям. При повышении увлажнения почвы и проявлении застойного увлажнения из состава выпадают дуб и ольха, как в основном ярусе, так и в подросте, а освободившуюся нишу занимают осина и береза. В подлеске также происходит существенное изменение видового состава растений.

Формирование повышенного увлажнения в почве по суходолу приводит к изменению типа условий местопроизрастания и типа леса, что содействует изменению видового состава растительности.

В пойме прежде всего высота и продолжительность стояния паводковых вод определяют видовой состав растительности и не оказывают существенного влияния на морфологические признаки пойменной почвы.

Список литературы

1. Углянец А. В., Власов Б. П., Хмелевский В. И. Водные ресурсы Национального парка «Припятский», их влияние на состояние лесных экосистем: монография. Минск: БГПУ, 2007. 163 с.

2. Гельтман В. С. Растительность Припятского заповедника // Заповедники Белоруссии: исследования. Минск: Ураджай, 1985. Вып. 9. С. 9–20.

3. Гельтман В. С., Моисеенко И. Ф. Пойменные леса Припяти и их трансформация в связи с мелиорацией. Минск: Наука и техника, 1990. 118 с.

4. Углянец А. В. Усыхание дубрав Переровско-Снядинского массива пойменных лесов Припяти // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. Ин-та леса НАН Беларуси. Гомель, 2005. Вып. 64. С. 88–104.

5. Солонович И. А. Пойменные дубравы Припятского заповедника // Ботаника (исследования): сб. науч. тр. Ин-та эксперимент. ботаники АН БССР. Минск, 1975. Вып. 17. С. 40–47.

6. Соколовский И. В., Беспалый А. А. Свойства почв дубрав Припятского Полесья по расположению их от сельхозугодий // Структура и морфогенез почвенного покрова в условиях антропогенного воздействия: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 17–20 сент. 2013 г. Минск, 2013. С. 59–62.

7. Юркевич И. Д. Выделение типов леса при лесоустроительных работах. Минск: Наука и техника, 1980. 120 с.

8. Герасименко М. В., Соколовский И. В. Почвообразующие породы и свойства почв суходольных дубрав Белорусского Полесья // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. Ин-та леса НАН Беларуси. Гомель, 2008. Вып. 68. С. 365–369.

9. Соколовский И. В., Беспалый А. А. Дерново-подзолистые грунтово-слабоглееватые и грунтово-глееватые лесные почвы Белорусского Полесья // Труды БГТУ. 2013. № 1 (153): Лесное хоз-во. С. 186–190.

10. Соколовский И. В., Беспалый А. А. Лесорастительные группы почв суходольных дубрав Белорусского Полесья // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. трудов Ин-та леса НАН Беларуси. Гомель, 2015. Вып. 75. С. 484–492.

11. Соколовский И. В., Беспалый А. А. Лесорастительные группы почв пойменных дубрав Белорусского Полесья // Труды БГТУ Сер. I, Лесное хозяйство. Природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2018. № 2 (210) С. 78–84.

References

1. Uglyanets A. V., Vlasov B. P., Khmelevskiy V. I. *Vodnye resursy Natsional'nogo parka "Pripyatskiy", ikh vliyanie na sostoyanie lesnykh ekosistem: monografiya* [Water resources of the National Park "Pripyat" and their impact on forest ecosystems: a monograph]. Minsk, BGPU Publ., 2007. 163 p.

2. Gel'tman V. S. Vegetation Pripyat reserve. *Zapovedniki Belorussii: issledovaniya* [Reserves of Belarus: research], 1985, vol. 9. pp. 9–20 (In Russian).

3. Gel'tman V. S., Moiseenko I. F. *Poymennye lesa Pripyati i ikh transformatsiya v svyazi s melioratsiey* [Floodplain forests of Pripyat and their transformation due to land reclamation]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1990. 118 p.

4. Uglyanets A. V. Drying of oak forests of Pererovo-Snyadinsky massif of floodplain forests of Pripyat. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva: sbornik nauchnykh trudov Instituta lesa Natsional'noy akademii nauk Belarusi* [Problems of forest science and forestry: coll. sci. works of the Forest Institute of the Natsional Academy of Sciences of Belarus], Gomel, 2005, issue 64, pp. 88–104 (In Russian).

5. Solonovich I. A. Floodplain oak forests of the Pripyat Reserve. *Botanika (issledovaniya): sbornik nauchnykh trudov Instituta experimental'noy botaniki Natsional'noy akademii nauk Belarusi* [Botany: coll. sci. research of the National Academy of Sciences of Belarus], Minsk, 1975, issue 17, pp. 40–47 (In Russian).

6. Sokolovskiy I. V., Bespalyy A. A. Soil properties of oak trees of Pripyat Polesie according to their location from farmland. *Struktura i morfogenez pochvennogo pokrova v usloviyakh antropogennogo vozdeystviya: Materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Structure and morphogenesis of soil cover in conditions of anthropogenic impact. Materials of the International scientific and practical conference]. BSU publishing center, 2013, pp. 59–62 (In Russian).

7. Yurkevich I. D. *Vydeleniye tipov lesa pri lesoustoitel'nykh rabotakh* [Selection of forest types in forest management works]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1980. 120 p.

8. Gerasimenko M. V., Sokolovskiy I. V. Soil-forming rocks and soil properties of the dry-bottomed oak groves of the Belorussian Polesie. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva: sbornik nauchnykh trudov Instituta lesa Natsional'noy akademii nauk Belarusi* [Problems of forest science and forestry: coll. sci. works of the Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus]. Gomel', 2008, issue 68, pp. 365–369 (In Russian).

9. Sokolovskiy I. V., Bespalyy A. A. Sod-podzolic soil-slightly gleyey and soil-gleyed forest soils of Belorussian Polesie. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 1: Forestry, pp. 186–190 (In Russian).

10. Sokolovskiy I. V., Bespalyy A. A. Forest-growing groups of soils of dry oak forests of the Belarusian Polesie. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva: sbornik nauchnykh trudov Instituta lesa Natsional'noy akademii nauk Belarusi* [Problems of forest science and forestry: coll. sci. works of the Forest Institute of the Academy of Sciences of Belarus]. Gomel', 2015, issue 75, pp. 484–492 (In Russian).

11. Sokolovskiy I. V., Bespalyy A. A. Forest-growing groups of soils of floodplain oak forests of the Belarusian Polesie. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, 2018, Forestry, Nature Management. Processing of Renewable Resources, no. 2 (210), pp. 78–84 (In Russian).

Информация об авторах

Беспалый Андрей Александрович – аспирант кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: andrei_bespalyi@mail.ru

Соколовский Иван Васильевич − кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: sivsoc@mail.ru

Information about the authors

Bespalyy Andrey Aleksandrovich – PhD student, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andrei_bespalyi@mail.ru

Sokolovskiy Ivan Vasil'yevich − PhD (Agriculture), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sivsoc@mail.ru

Поступила 07.03.2020

УДК 582.475.2:635.03:631.8

Р. И. Караневский, А. Ф. Келько, Г. А. Холопук
Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ РОСТА ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ СЕЯНЦЕВ ПИХТЫ БЕЛОЙ (*ABIES ALBA* MILL.) В КОНТЕЙНЕРАХ

Выращивание качественного посадочного материала является одной из приоритетных задач современного питомниководства. Совершенствование технологий происходит в том числе за счет поиска и использования новых удобрений, регуляторов роста, пестицидов и др. Особое внимание при этом уделяется экологически безопасным препаратам, к которым в том числе относятся Ростмомент, ВГ и Оксидат торфа, 4% ж. В данном исследовании проводилось изучение влияния этих препаратов на биометрические параметры и сохранность саженцев пихты белой (*Abies alba* Mill.) при выращивании в контейнерах. Опыты выполнялись в течение двух лет. Препараты вносились в виде растворов 1, 2 и 3%-ной концентрации, а также в сухом виде в количестве 10, 20 и 30 мл на 1 л субстрата при пикировке сеянцев.

Установлено, что целесообразно использование 2%-ного раствора Ростмомента при ежегодной 3-кратной обработке растений. Внесение препарата в субстрат в сухом виде не рекомендуется. Использование Оксидата торфа в качестве регулятора роста в концентрациях 1, 2 и 3% для саженцев пихты неэффективно.

Ключевые слова: пихта белая, посадочный материал, регуляторы роста, Ростмомент, Оксидат торфа, биометрические параметры.

R. I. Karaneuski, H. F. Kelko, G. A. Kholopuk
Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus

EXPERIENCE OF APPLYING OF ENVIRONMENTALLY SAFE GROWTH REGULATORS WHILE GROWING SEEDLINGS OF WHITE FIR (*ABIES ALBA* MILL.) IN CONTAINERS

Growing quality planting material is one of the priority tasks of modern nursery farming. Improvement of technology occurs, among other things, through the search and use of new fertilizers, growth regulators, pesticides, etc. Particular attention is paid to environmentally friendly drugs, which include Rostmoment, VG and peat oxidate, 4% w. In this study, we studied the effect of these drugs on the biometric parameters and the safety of white fir seedlings (*Abies alba* Mill.) When grown in containers. The experiments were carried out for two years. The preparations were applied in the form of solutions of 1, 2 and 3% concentration, as well as in dry form in the amount of 10, 20 and 30 ml per 1 liter of substrate during pickling of seedlings.

It was found that it is advisable to use a 2% solution of Rostmoment with annual 3-fold treatment of plants. The introduction of the drug into the substrate in a dry form is not recommended. The use of peat oxidate as a growth regulator in concentrations of 1, 2, and 3% for fir seedlings is ineffective.

Key words: *Abies alba*, planting seedlings, growth regulators, Rostmoment, Peat oxidate, biometric parameters.

Введение. Качественный посадочной материал является основой успешного выполнения актуальных задач в лесокультурном производстве и зеленом строительстве, предусматривающих ряд мероприятий по совершенствованию питомнического хозяйства. Разработка и внедрение современных интенсивных технологий выращивания посадочного материала с применением новых регуляторов роста, микроудобрений, пестицидов и т. д. являются приоритетными в данном направлении. В частности, использование регуляторов роста способствует увеличению интенсивности роста сеянцев и их устойчивости к неблагоприятным факторам внешней среды, грибным и бактериальным заболеваниям и позволяет сократить сроки выращивания посадочного материала [1, 2]. Это особенно важно при культивировании редких и ценных видов растений, к которым относится пихта белая (*Abies alba* Mill.).

Разрешенные к применению на территории Республики Беларусь регуляторы роста зарегистрированы в Государственном реестре средств защиты растений (пестицидов) и

удобрений [3] и широко испытаны на многих сельскохозяйственных культурах, а также некоторых травянистых и древесных декоративных растениях [4–7]. Практическое применение тех или иных препаратов сопряжено со специфичностью их влияния на растение в зависимости от ряда факторов, включая не только концентрацию используемого вещества и условия его применения, но и биологические особенности вида. В связи с этим любой регулятор в каждом конкретном случае может выступать как в качестве стимулятора, так и в качестве ингибитора роста [8, 9]. Поэтому возникает необходимость экспериментальных исследований, направленных на выявление особенностей влияния отдельных препаратов на различные хозяйственно ценные виды растений. При этом предпочтение следует отдавать экологически безопасным препаратам на натуральной основе, которые по своей эффективности сопоставимы с искусственно синтезированными [10]. Среди таких препаратов особый интерес представляют Ростмомент и Оксидат торфа, которые широко исследуются в последние годы и применяются на практике.

Ростмомент, ВГ – регулятор роста растений на основе дрожжей (р. *Saccharomyces* и продукты их метаболизма) [3], который способствует улучшению роста и развития растений. Действие регулятора основано на активизации биохимических процессов в живой клетке.

Оксидат торфа, 4% ж. – водный концентрат биологически активных веществ (гуматы аммония, аминокислоты, полипептиды), содержащихся в торфе. Препарат усиливает действие средств защиты, протравителей и минеральных удобрений, что позволяет снизить дозу их применения [11]. Действие оксидата торфа основано на стимуляции иммунной системы и нормализации биохимических процессов в живой клетке.

Целью нашего исследования было определение возможности использования указанных препаратов для повышения качества посадочного материала пихты белой при выращивании в контейнерах.

Семена пихты собирали в конце августа – начале сентября. Перед посевом семена прошли этап стратификации путем снегования. Высев осуществляли в конце апреля в культивационные гряды, заполненные субстратом из смеси дерновой земли и верхового торфа (1 : 1 по объему). На третий год выращивания (весной) проводили пикировку сеянцев в литровые контейнеры с использованием субстрата такого же состава.

Исследования выполняли на протяжении двух лет. В первый год опыта Ростмомент вносили путем полива саженцев растворами препарата в концентрациях 1, 2 и 3% (расход растворов – 10 л/м^2), а также путем однократного внесения сухого препарата в субстрат при пикировке (варианты – 10, 20 и 30 мл на 1 л субстрата). Оксидат торфа вносили путем полива 1, 2 и 3%-ными растворами (расход растворов – 10 л/м^2).

На второй год опыта часть растений продолжали поливать растворами регуляторов в тех же концентрациях, другую часть саженцев оставляли без обработки с целью выявления возможного накопительного эффекта препаратов.

Обработка растворами проводилась 3-кратно в течение вегетативного периода (I декада мая, I декада июня и I декада июля). Контроль – необработанные саженцы.

Учет результатов выполняли осенью на первый и второй год опыта. Определяли диаметр ствола у корневой шейки, высоту растений, годовой прирост и сохранность саженцев. Обработку данных осуществляли с использованием методов описательной статистики, значимость различий устанавливали с помощью U-критерия Манна – Уитни [12, 13].

Основная часть. Результаты опытов по оценке влияния регуляторов роста на биометрические параметры и сохранность саженцев пихты белой представлены в таблице.

Из данных таблицы следует, что в первый год опыта обработка саженцев Ростмоментом в виде растворов оказала значимое положительное влияние лишь на диаметр стволиков у корневой шейки, тогда как остальные параметры оказались сопоставимы с контрольным вариантом. Внесение регулятора в субстрат в сухом виде в количестве 20 и 30 мл на 1 л негативно повлияло на сохранность саженцев и их биометрические параметры. Так, годичный прирост растений в этих вариантах снизился в 2 раза, а высота оказалась на 3,1–3,6 см меньше по сравнению с контролем. Внесение Ростмомента в дозе 20 мл/л привело к гибели 40,6% саженцев пихты к концу вегетативного периода, при концентрации препарата 30 мл/л погибло 96,9% растений. По результатам испытаний первого года выраженного отрицательного эффекта от сухого внесения Ростмомента в субстрат в количестве 10 мл/л выявлено не было. Однако на второй год выращивания саженцев в этом варианте произошла гибель части растений, и с учетом результатов первого года количество выпавших пихт составило 44,3%. Прирост саженцев снизился в 1,4 раза по сравнению с контролем, значимо ниже оказалась и их высота. Продолжилось на второй год угнетение роста пихт в вариантах с бóльшими дозами сухого препарата.

Влияние регуляторов роста на биометрические параметры и сохранность саженцев пихты белой (*Abies alba* Mill.)

Вариант опыта			Биометрические параметры саженцев			Сохранность растений, %
			Диаметр ствола у корневой шейки, мм	Высота, см	Прирост, см	
1-й год						
Контроль			3,2 ± 0,1 b	7,9 ± 0,3 abc	3,2 ± 0,2 ab	100
Ростмомент	Обработка раствором	1%-ный р-р	3,7 ± 0,1 a	7,0 ± 0,3 cdj	2,8 ± 0,2 be	91,7
		2%-ный р-р	3,6 ± 0,1 a	7,8 ± 0,3 af	3,5 ± 0,2 ac	98,3
		3%-ный р-р	3,5 ± 0,1 a	7,2 ± 0,2 be	3,4 ± 0,2 ac	96,7
	Внесение в субстрат в сухом виде	10 мл/л	3,0 ± 0,1 b	7,0 ± 0,3 deh	3,0 ± 0,1 bce	98,4
		20 мл/л	2,4 ± 0,2 c	4,7 ± 0,2 i	1,6 ± 0,1 d	59,4
		30 мл/л	2,9 ± 0,8 abc	4,3 ± 0,6 ig	1,6 ± 0,1 de	3,1
Оксидат торфа	Обработка раствором	1%-ный р-р	3,2 ± 0,1 b	6,3 ± 0,2 gh	2,8 ± 0,1 be	100
		2%-ный р-р	3,2 ± 0,1 b	7,1 ± 0,3 defj	3,4 ± 0,1 a	96,7
		3%-ный р-р	3,2 ± 0,1 b	7,4 ± 0,3 bdf	3,1 ± 0,1 ab	98,3
2-й год						
Контроль			4,0 ± 0,1 cd	11,9 ± 0,3 bck	4,1 ± 0,2 ci	98,4
Ростмомент	Обработка раствором	1%-ный р-р	4,6 ± 0,3 abcf	12,8 ± 1,0 abh	5,3 ± 0,6 abch	90,0
		2%-ный р-р	5,2 ± 0,2 a	13,9 ± 0,7 a	6,3 ± 0,5 a	96,7
		3%-ный р-р	4,4 ± 0,2 bc	11,7 ± 0,7 bchi	5,3 ± 0,8 abcgh	93,3
	Без обработки раствором	1%-ный р-р	4,5 ± 0,1 bhj	10,9 ± 0,7 bej	4,3 ± 0,5 bcdh	93,3
		2%-ный р-р	4,8 ± 0,2 abfj	11,9 ± 0,7 abh	5,0 ± 0,4 abdh	96,7
		3%-ный р-р	4,9 ± 0,2 ab	13,1 ± 0,5 ac	5,2 ± 0,5 abdh	93,3
	Внесение в субстрат в сухом виде	10 мл/л	3,7 ± 0,2 dgi	9,7 ± 0,6 degj	2,9 ± 0,4 e	55,7
		20 мл/л	2,4 ± 0,1 e	5,5 ± 0,3 f	1,0 ± 0,7 f	54,1
		30 мл/л	2,7 ± 0,1 efg	5,1 ± 0,5 g	1,6 ± 0,6 defg	3,1
Оксидат торфа	Обработка раствором	1%-ный р-р	4,1 ± 0,2 chi	11,5 ± 0,6 bchi	5,2 ± 0,4 ah	100
		2%-ный р-р	4,2 ± 0,2 cdh	11,3 ± 0,6 bhi	4,7 ± 0,3 bh	96,7
		3%-ный р-р	3,9 ± 0,1 cd	12,2 ± 0,5 abi	4,3 ± 0,2 bi	98,3
	Без обработки раствором	1%-ный р-р	4,1 ± 0,1 cdh	10,3 ± 0,5 he	4,0 ± 0,3 bdi	100
		2%-ный р-р	4,0 ± 0,2 cd	11,0 ± 0,6 hijk	4,3 ± 0,3 bhdi	96,7
		3%-ный р-р	4,3 ± 0,2 cj	12,3 ± 0,5 aik	4,7 ± 0,3 bh	98,3

Примечание. Средние значения, отмеченные одинаковыми буквами, не различаются значимо при $p < 0,05$.

По результатам второго года исследований был выявлен положительный накопительный эффект от полива саженцев в первый год выращивания 2- и 3%-ными растворами Ростмомента. Как следует из данных таблицы, у растений пихты в этих вариантах отмечалось значимое увеличение диаметра стволиков у корневой шейки по сравнению с контролем (на 20–23%) и годичного прироста (на 22–27%). Обработка саженцев 1%-ным раствором препарата не оказала накопительного эффекта, а также не повлияла на параметры саженцев при поливе на второй год.

В то же время продолжение обработки растений на второй год выращивания 2%-ным раствором Ростмомента оказалось наиболее эффективным среди других вариантов и привело к увеличению диаметра стволиков у корневой шейки на 30% по сравнению с контролем, прироста – на 54%, высоты – на 17%.

Обработка растений на второй год 3%-ным раствором Ростмомента не оказала значимого влияния на параметры саженцев. Учитывая положительное влияние на саженцы 2%-ного раствора, можно предположить, что более высокая концентрация препарата начинает оказывать угнетающее действие на пихты со второго года использования.

Нами было установлено, что применение Оксидата торфа в исследованных концентрациях при выращивании саженцев пихты белой неэффективно. Из данных таблицы следует, что биометрические параметры саженцев, обработанных растворами как в первый, так и во второй годы, значимо не отличаются от контрольного варианта. Накопительного эффекта также не отмечено.

Заключение. Таким образом, исследование влияния экологически безопасных регуляторов роста на биометрические параметры и сохранность саженцев пихты белой при выращивании в контейнерах показало, что целесообразно использование препарата Ростмомент, ВГ в виде

2%-ного раствора при ежегодной 3-кратной обработке растений. Это позволяет улучшить качество посадочного материала, что проявляется в значимом увеличении годичного прироста побегов и диаметра стволика у корневой шейки. Внесение препарата Ростмомент в субстрат в сухом виде не рекомендуется, поскольку при этом резко снижается сохранность растений и угнетаются рост и развитие саженцев. Использование Оксидата торфа в качестве регулятора роста в концентрациях 1, 2 и 3% для саженцев пихты неэффективно, так как за время выполнения исследования значимого их влияния на биометрические параметры растений не выявлено.

Список литературы

1. Борисова В. В. Влияние регуляторов роста растений на биометрические показатели однолетних сеянцев лиственницы европейской при выращивании их в теплице // Сб. науч. тр. Ин-та леса НАН Беларуси. 2003. Вып. 57: Лес в жизни восточных славян от Киевской Руси до наших дней. С. 166–168.

2. Ладвищенко В. В., Пальченко А. К. Влияние регуляторов роста на скорость роста проростков ели европейской // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2007. Вып. XV. С. 240–243.

3. Государственный реестр средств защиты растений (пестицидов) и удобрений, разрешенных к применению на территории Республики Беларусь. Справочное издание / Мин. сельхоз. прод. Республика Беларусь, ГУ «Главная государственная инспекция по семеноводству, карантину и защите растений»; сост. Р. А. Новицкий [и др.]. Минск: Белбланкавыдат, 2017. 686 с.

4. Саскевич П. А., Кажарский В. Р., Козлов С. Н. Применение регуляторов роста при возделывании сельскохозяйственных культур. Горки: БГСХА, 2009. 295 с.

5. Почтовая Н. Л., Орлов М. И., Скорина В. В. Эффективность применения регулятора роста Ростмомент при возделывании овощных культур // Современное состояние и перспективы инновационного развития овощеводства: материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Самохваловичи, 8–11 июля 2014 г. / НАН Беларуси, РНПДУП «Институт овощеводства». Самохваловичи, 2014. С. 119–122.

6. Применение регулятора роста Ростмомент при возделывании плодовых, ягодных и овощных культур: рекомендации / разраб.: В. В. Скорина [и др.]. Горки: БГСХА, 2014. 24 с.

7. Босак В. Н., Сачивко Т. В. Эффективность применения минеральных удобрений и регуляторов роста при возделывании фасоли овощной // Земледелие и защита растений. 2017. № 4. С. 42–44.

8. Мананков М. К., Мусиенко Н. Н., Мананкова О. П. Регуляторы роста растений и практика их применения. Киев: Фитосоциоцентр, 2002. 183 с.

9. Деева В. П. Физиолого-биохимические и генетические аспекты избирательного действия регуляторов роста и повышения адаптационных свойств растительного организма // Ботаника: исследования: сб. ст. / Ин-т эксперимент. ботан. им. В. Ф. Купревича. 2005. Вып. 33. С. 232–243.

10. Торчик В. И., Холопук Г. А. Интродукция псевдотсуги Мензиса (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) в условиях Беларуси. Минск: Белорусская наука, 2013. 138 с.

11. Экологически чистые препараты для растениеводства из побочных продуктов переработки катрофеля / В. И. Домаш [и др.] // Труды Белорусского государственного университета. 2010. Т. 5, ч. 2. С. 111–120.

12. Рокицкий П. Ф. Биологическая статистика. Минск: Вышэйшая школа, 1973. 320 с.

13. Сиделев С. И. Математические методы в биологии и экологии: введение в элементарную биометрию: учеб. пособие / Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Демидова. Ярославль: ЯрГУ, 2012. 140 с.

References

1. Borisova V. V. The influence of plant growth regulators on the biometric parameters of annual seedlings of European larch when growing in a greenhouse. *Sbornik nauchnykh trudov Instituta lesa NAN Belarusi* [Proceedings of the Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus], 2003, no. 57: Forest in the life of the Eastern Slavs from Kievan Rus to the present day, pp. 166–168 (In Russian).

2. Ladvishchenko V. V., Pal'chenko A. K. The influence of growth regulators on growth rate. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forestry, 2007, issue 15, pp. 240–243 (In Russian).

3. Piskun A. V., Hvaley O. A., Gololob T. I., Apanovich A. Yu., Boyarchuk V. E., Globazh O. A., Pesterev S. A. *Gosudarstvennyy reestr sredstv zashchity rasteniy (pestitsydov) i udobreniy, razreshennykh k primeneniyu na territorii Respubliki Belarus. Spravochnoe izdanie* [The state register of plant protection products (pesticides) and fertilizers approved for use on the territory of the Republic of Belarus. Reference edition]. Minsk, Belblankavydat Publ., 2017. 686 p.

4. Saskevich P. A., Kazharskiy V. R., Kozlov S. N. *Primenenie regulyatorov rosta pri vozdelyvanii sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [The use of growth regulators in the cultivation of crops]. Gorki, BGSKHA Publ., 2009. 295 p.

5. Pochtovaya N. L., Orlov M. I., Skorina V. V. The effectiveness of the growth regulator Rostmoment in the cultivation of vegetable crops. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii ("Sovremennoe sostoyanie i perspektivy innovatsionnogo razvitiya ovoshchevodstva")* [Materials of international scientific and practical conference ("The current state and prospects of innovative development of vegetable growing")]. Samokhvalovochi, 2014, pp. 119–122 (In Russian).

6. Skorina V. V., Pugachev R. M., Pochtovaya N. L., Karpitskiy A. M., Ganush G. I., Zabashtanskiy I. P., Sharko Z. G., Bachura R. V., Orlov M. I., Grakun V. V. *Primenenie regulyatora rosta Rostmoment pri vozdelyvanii plodovykh, yagodnykh i ovoshchnykh kul'tur: rekomendatsii* [The use of the growth regulator Rostmoment in the cultivation of fruit, berry and vegetable crops: recommendations]. Gorki, BGSKHA Publ., 2014. 24 p.

7. Bosak V. N., Sachivko T. V. The effectiveness of the use of mineral fertilizers and growth regulators in the cultivation of vegetable beans. *Zemledelie i zashchita rasteniy* [Agriculture and plant protection], 2017, no. 4, pp. 42–44 (In Russian).

8. Manankov M. K., Musienko N. N., Manankova O. P. *Regulyatory rosta rasteniy i praktika ikh primeneniya* [Plant growth regulators and their application]. Kiev, Fitosotsiocentr Publ., 2002. 183 p.

9. Deyeva V. P. Physiological, biochemical and genetic aspects of the selective action of growth regulators and increase the adaptive properties of the plant organism. *Botanika: issledovaniya* [Botany: research], 2005, issue 33, pp. 232–243 (In Russian).

10. Torchik V. I., Kholopuk G. A. *Introduktsiya psevdotsugi Menzisa (Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco) v usloviyakh Belarusi* [Introduction of the Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) in Belarus]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2013. 138 p.

11. Domash V. I., Azizbekyan S. G., Sharpio T. P., Zabreiko S. A., Timofeeva V. A., Golubeva V. S. Organic preparations for crop production from by-products of the processing of. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceeding of BSU], 2010, vol. 5, part 2, pp. 111–120 (In Russian).

12. Rokitskiy P. F. *Biologicheskaya statistika* [Biological statistics]. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1973. 320 p.

13. Sidelev S. I. *Matematicheskie metody v biologii i ekologii: vvedenie v elementarnuyu biometriyu: uchebnoe posobie* [Mathematical methods in biology and ecology: introduction to elementary biometry: a training manual]. Yaroslavl', YarGU Publ., 2012. 140 p.

Информация об авторах

Караневский Руслан Игоревич – аспирант, младший научный сотрудник. Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 2в, Республика Беларусь). E-mail: ruskar1992@gmail.com

Келько Анна Федоровна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник. Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 2в, Республика Беларусь). E-mail: anna.kelko@inbox.ru

Холопук Геннадий Анатольевич – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник. Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 2в, Республика Беларусь). E-mail: gax.forestbat@gmail.com

Information about the authors

Karaneuski Ruslan Igorevich – PhD student, Junior Researcher. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Surganova str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ruskar1992@gmail.com

Kelko Hanna Fedorovna – PhD (Biology), Senior Researcher. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Surganova str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: anna.kelko@inbox.ru

Kholopuk Gennadiy Anatol'evich – PhD (Agriculture), Senior Researcher. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Surganova str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gax.forestbat@gmail.com

Поступила 11.03.2020

УДК 577.2:575:582.632.1(4-11)

П. С. Кирьянов
Институт леса Национальной академии наук Беларуси

ПОИСК СЕЛЕКТИВНЫХ МАРКЕРОВ, АССОЦИИРОВАННЫХ С АНОМАЛЬНЫМ КСИЛОГЕНЕЗОМ КАРЕЛЬСКОЙ БЕРЕЗЫ (*BETULA PENDULA* ROTH. VAR. *CARELICA* MERKL.), С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО СЕКВЕНИРОВАНИЯ

Объектами молекулярно-генетических исследований явились индивиды березы повислой (*Betula pendula* Roth.) и карельской березы (*Betula pendula* Roth. var. *carelica* Merkl.). Экспериментальный материал в виде клеток камбиальной ткани узорчатых и безузорчатых форм берез по отдельности был собран с различных участков (узлы и междоузлия) ствола деревьев. С использованием технологии высокопроизводительного секвенирования для каждого растения получены индивидуальные транскриптомные профили. Произведено выравнивание, сборка и аннотация контигов транскриптомных профилей берез, а также первичная обработка полученной информации. В результате проведенного исследования идентифицированы гены, ассоциированные с пролиферацией клеток камбиальной зоны (CesA, PIN1, ATHB-15, ARF6, ARF18, EBP1, TDR), а также наследственные детерминанты, контролирующие углеводный обмен (SUS, SWEET, DPE2). Аннотированные транскрибируемые последовательности являются перспективными ДНК-маркерами, которые могут быть использованы при проведении селекционных мероприятий, направленных на получение высокоузорчатых форм карельской березы. Для всех идентифицированных генетических маркеров разработаны наборы олигонуклеотидных праймеров, которые будут в дальнейшем использоваться для оценки уровня экспрессии селективных локусов карельской березы методом полимеразной цепной реакции в реальном времени.

Ключевые слова: карельская береза, береза повислая, высокопроизводительное секвенирование.

P. S. Kiryanov
Institute of Forest of the National Academy of Sciences of Belarus

SEARCH FOR SELECTABLE MARKERS ASSOCIATED WITH ANOMALOUS XYLOGENESIS OF THE CURLY BIRCH USING NEXT-GENERATION SEQUENCING (*BETULA PENDULA* ROTH. VAR. *CARELICA* MERKL.)

The objects of molecular genetic studies were individuals of silver birch (*Betula pendula* Roth.) and curly birch (*Betula pendula* Roth. var. *carelica* Merkl.). The experimental material was represented by cambial tissue cells of textured and non-textured wood forms of birch trees was separately collected from various sections (nodes and internodes) of the tree trunk. Using the technology of next generation sequencing, individual transcriptome profiles were obtained for each plant. Alignment, assembly and annotation of contigs of transcriptome profiles of birch trees, as well as primary processing of the received information were performed. As a result of the study, genes associated with the proliferation of cambial zone cells (CesA, PIN1, ATHB-15, ARF6, ARF18, EBP1, TDR), as well as hereditary determinants that control carbohydrate metabolism (SUS, SWEET, DPE2) were identified. Annotated transcribed sequences are promising DNA markers that can be used in breeding activities aimed at obtaining highly patterned forms of curly birch. For all identified genetic markers, sets of oligonucleotide primers have been developed that will be further used to evaluate the expression level of the curly birch selective loci by real-time polymerase chain reaction.

Key words: curly birch, silver birch, next-generation sequencing.

Древесина является возобновляемым природным ресурсом, который используется в деревообрабатывающей промышленности и применяется в качестве основы многих строительных и отделочных материалов, необходимых для человека. Гистологически древесина высших растений представлена ксилемной тканью, дифференциация клеток которой происходит из прокамбия в период активного роста во время периода вегетации. Данный процесс назван ксилогенезом и подразумевает под собой деление меристематических клеток, их удлинение, спецификацию, рост клеточной стенки и лигнификацию. Заканчивается данный процесс смертью протопласта, что формирует просвет проводящих ксилемных путей для транспорта

воды и растворенных питательных веществ. На данный момент накоплено значительное количество цитологических, гистологических и анатомических исследований ксилемы, которые не отображают молекулярных и генетических процессов формирования проводящих тканей. Для исследования подобных механизмов используют мутантные растения *Arabidopsis thaliana*, а также каллусные и суспензионные культуры клеток травянистых и древесных растений [1–3]. Такие системы позволяют экзогенно вводить различные стимуляторы роста и ферменты, вызывающие дифференциацию растительных клеток, с целью наблюдения и последующего генетического анализа активных генов, участвующих в процессе ксилогенеза. В свою очередь данные технологии требуют получения и длительного поддержания культуры клеток, стерильных условий культивирования и использования биологически активных веществ, что значительно замедляет процесс получения результатов, а также требует дополнительных навыков и материальных затрат. Введение экзогенных стимуляторов мало схоже с естественным накоплением тех же веществ, продуцируемых растением (несоответствие концентрации, единовременность введения, отсутствие сигнальных систем, присущих целому растению, что не встречается в природных условиях). В связи с описанными негативными факторами использования культуры клеток и мутантных растений с пониженной или повышенной активностью анализируемого гена для выявления особенностей процессов ксилогенеза, на наш взгляд, перспективно использовать в качестве объектов исследований березу повислую (*Betula pendula* Roth.) и ее разновидность – карельскую березу (*Betula pendula* Roth. var. *carelica* Merkl.). Данные растения схожи по количеству хромосом, нуклеотидной последовательности хлоропластного генома и произрастают совместно в одинаковых лесорастительных условиях [4, 5]. Однако у карельской березы, в отличии от березы повислой, выявлен особый фенотипический признак – узорчатый рисунок древесины. По мнению ряда исследователей, проявление данной особенности связано с процессами аномального ксилогенеза, что выражается в неравномерном разрастании клеток ксилемы и существенной паренхимизации проводящих тканей. Также необходимо отметить, что узорчатость древесины наследуется при вегетативном и половом размножении карельской березы, что говорит о генетической детерминации данного признака. Таким образом, береза повислая и карельская береза являются ценными модельными объектами для изучения ксилогенеза древесных покрытосеменных растений ввиду возможности использования биологического материала данных растений естественного вегетативного происхождения.

Целью данной работы явилось проведение высокопроизводительного секвенирования транскриптомных профилей карельской березы и березы повислой, выделенных из клеток тканей ксилемы, а также поиск селективных маркеров, ассоциированных с аномальным ксилогенезом карельской березы.

Основная часть. Экспериментальный материал в виде клеток камбиальной ткани узорчатых и безузорчатых растений берез был собран с деревьев, произрастающих в однотипных лесорастительных условиях на территории ГЛХУ «Кореневская экспериментальная лесная база». Из одинаковой навески растительной ткани выделяли тотальную РНК с помощью набора GeneJET Plant RNA Purification Mini Kit (Thermo Scientific, США) по методике фирмы-производителя. Далее проводили обработку DNaseI, RNase-free (Thermo Scientific, США) для деградации яДНК, хпДНК, мтДНК, а также добавляли RNase Inhibitor (Thermo Scientific, США) с целью инактивации ферментов, специфичных к молекулам РНК, проявляющих экзо- и эндонуклеазную активность. Для получения кДНК использовали набор Maxima H Minus Double-Stranded cDNA Synthesis Kit (Thermo Scientific, США). Библиотеки кДНК готовили с использованием набора Ion Plus Fragment Library Kit (Thermo Scientific, США). Эмульсионную ПЦР проводили в планшетном амплификаторе Ion One Touch 2 System (Thermo Scientific, США) с использованием реагентов для пробоподготовки Ion PGM Template OT2 200 Kit (Thermo Scientific, США). Обогащение микросфер производили с помощью автоматической пробоподготовки Ion OneTouch ES с использованием Ion PGM Template OT2 200 Kit и Ion PGM Enrichment Beads (Thermo Scientific, США). Секвенирование выполняли на базе геномного анализатора Ion PGM System (Thermo Scientific, США) и полупроводникового микрочипа Ion 314 Chip V2. Первичная обработка данных проводилась в автоматическом режиме при помощи программного обеспечения Ion Torrent Suite v. 4.0 (Thermo Scientific, США). Для сборки контигов и обработки данных пользовались программой SeqMan NGen v. 11 (DNASTAR, Израиль). Аннотацию секвенированных последовательностей осуществляли с помощью программы Blast2Go (BioBam, Испания).

В результате секвенирования и сборки кДНК-библиотек было получено в среднем 15,9 тыс. последовательностей. В дальнейшем были отобраны контиги, содержащие концевые поли-А участки, – признак зрелой молекулы мРНК,

готовой для трансляции, и произведена их функциональная аннотация. В среднем данный процесс был осуществлен для 2,8 тыс. последовательностей в каждом секвенированном транскриптоме.

Необходимо отметить, что среди полученных аннотированных последовательностей нами были отобраны селективные маркеры, которые теоретически способны оказывать значительное влияние на процессы и частные этапы формирования ксилемы. Также были рассмотрены гены, описанные раннее в публикациях Новицкой Л. Л. с соавторами, в контексте теории об аномальном морфогенезе проводящих тканей карельской березы [6, 7].

Наименьшей по численности группой являлись гомологи генов, отвечающие за сигнальные пути распределения ауксина в растении. Как известно, ауксин участвует во многих процессах формирования габитуса древесных растений, регулируя ростовые процессы и развитие отдельных вегетативных и генеративных органов. В данном случае нам удалось выявить транскрипты гена Big (auxin transport protein BIG), PIN1 (auxin efflux carrier component 1), ARF6 и ARF18 (auxin response factor 6, auxin response factor 18). Также были обнаружены транскрипты генов, являющиеся негативными регуляторами синтеза ауксина, которые, по всей видимости, связываются с белками положительной регуляции и препятствуют их взаимодействию с промоторными сигнальными участками: IAA8, IAA9, IAA16 (auxin-responsive protein IAA8, auxin-responsive protein IAA8, auxin-responsive protein IAA16) [8–11].

Гены, регулирующие лигнификацию вторичной клеточной стенки, были представлены CSE (caffeoylshikimate esterase), CAD (cinnamyl alcohol dehydrogenase). Активность гена CSE напрямую коррелирует с интенсивностью лигнификации клеточных стенок, в свою очередь, снижение экспрессии данного гена у карельской березы может способствовать замедлению роста растений и формированию особенностей габитуальных форм, отмеченных многими исследователями. При получении мутантных растений *Populus spp.* с низкой экспрессией гена CSE отмечены нарушения в строении тканей ксилемы и более высокое содержание целлюлозы [12]. В свою очередь ген CAD является ключевым ферментов на пути биосинтеза трех предшественников лигнина [13]. Снижение активности данного гена в трансгенных растениях *Brachypodium distachyon* также приводили к изменению фенотипа растений и общему увеличению биомассы [14].

Формирование клеточной стенки напрямую зависит от генов дифференциации клеточных структур из прокамбия и первичных этапов ксилогенеза, включающих этапы образования целлюлозы и других полимерных компонентов, составляющих основу проводящей системы растения. В связи с этим нами были идентифицированы молекулы кДНК целюлозосинтазы (CesA), при этом в рассматриваемом нами транскриптоме присутствовали 1, 2, 4, 8-я субъединицы данного фермента. CesA катализирует присоединение остатков D-глюкозы друг к другу и, по итогу, формирует полисахарид, который в последующем складывается в микрофибриллы целлюлозы [15]. При переходе ко вторичной клеточной стенке кроме целлюлозы в ней обнаруживаются пективные полисахариды.

В качестве генетического детерминанта процесса выработки пектиновых полисахаридов были детектированы GAUT6 (probable galacturonosyltransferase 1, 4, 9, 12), GALS3-подобный (galactan beta-1,4-galactosyltransferase GALS3-like) [16–17].

Гены сахаросинтазы были представлены большим количеством транскриптов в тканях ксилемы обеих разновидностей берез. Фермент сахаросинтаза (SUS, sucrose synthase) катализирует превращение сахарозы в УДФ-глюкозу и фруктозу, которые затем используются во многих анаболических путях в качестве субстрата. Ранее уже были высказаны предположения об участии данного гена в формировании особенностей карельской березы, связанные с низким содержанием транскриптов сахаросинтазы, и увеличении роли апопластной инвертазы в утилизации сахарозы в условиях дифференциации клеток латеральных меристем [6, 18]. Кроме того, в контексте особенностей углеводного обмена нами были получены аннотированные последовательности генов SWEET (bidirectional sugar transporter SWEET1-like) – возможный участник переноса сахарозы из листьев в места акцепторных тканей меристемы, DPE2 (4-alpha-glucanotransferase DPE2) – необходим для цитозольного метаболизма мальтозы, полученного из крахмала [19, 20]. Идентифицированные нуклеотидные последовательности генов FBA1, FBA3 и FBA4 (fructose-bisphosphate aldolase) являются матрицами для построения ферментов гликолиза и способствуют расщеплению фруктозо-1,6-дифосфата на два триозофосфата: глицеральдегид-3-фосфат (альдозу) и дигидроксиацетонфосфат (кетозу). Также был выявлен ген GAPC1 (glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase), выполняющий превращение глицеральдегид-3-фосфата в 1,3-дифосфоглицерат первой реакции второго этапа гликолиза [21].

Ввиду высокого накопления слабо дифференцированных паренхимных клеток в стволе карельской березы нами также были отобраны

гены, участвующие в делении и развитии клеток при их спецификации из латеральных меристем. Например, гиперэкспрессия гена EBP1 (ERBB-3 binding protein 1) достоверно увеличивает пролиферацию клеточных структур на ранних этапах формирования вегетативных органов у растений картофеля и арабидопсиса, при этом уровень экспрессии показывал высокую степень зависимости от уровня ауксина в соответствующих тканях растения [22]. Также необходимо отметить, что мутанты, содержащие нефункциональный ген EBP1, имели нетипичные фенотипы и характеризовались низкорослостью, в свою очередь у мутантных растений картофеля достоверно снижалась урожайность корнеплодов в сравнении с растениями, содержащими ген EBP1 дикого типа.

ATHB-15 (Homeobox-leucine zipper protein ATHB-15) специфичен для клеток прокамбия и экспрессируется на ранних этапах дифференцировки клеток-предшественников ксилемы [23].

На более поздних этапах формирования ксилемных тканей функционируют гены XTH23, XTH33, XTHB (probable xyloglucan endotransglucosylase/hydrolase protein 23, 33, B), являющиеся гомологами генов XTH, полученных ранее. В нашем исследовании удалось выявить присутствие данных генов в транскриптомном профиле ксилемных тканей, в отличии от генов XTH5, XTH7, XTH14, обнаруженных в яблоках и киви [24].

Среди генов, выполняющих матричную функцию для синтеза белков с сигнальной функцией, участвующих в поддержании активности прокамбия, можно выделить нуклеотидную последовательсность TDR (Leucine-rich repeat receptor-like protein kinase TDR). Данный ген был детектирован преимущественно на растениях *Arabidopsis thaliana* и выполняет матричную функцию для синтеза трансмембранного белка, участвующего в передаче межклеточных сигналов, а также опосредующего иммунные ответы на изменение окружающей среды [25]. Сходную активность проявляет ген AGP18 (Lysine-rich arabinogalactan protein 18), который представлен арабиногалактоновым белком, находящимся на поверхности клетки растения [26]. В растениях арабидопсиса данное семейство белков кодируется тремя генами AGP17, AGP18, AGP19. Мутантные растения с повышенной экспрессией гомологов гена AGP обладали меньшей длиной главного стебля, удлиненными латеральными вегетативными органами и меньшим количеством семян, что указывает на влияние указанного гена на процессы роста и развития растения.

Аннотированные нами гены являются перспективными селективными локусами, которые могут быть использованы при выполнении идентификации узорчатых особей карельской березы. Подобная тест-система даст возможность эффективно проводить селекционные мероприятия по получению более продуктивных и устойчивых форм карельской березы, характеризующихся высокой степенью декоративности текстуры древесины.

Для всех детектированных нуклеотидных последовательностей были разработаны синтетические олигонуклеотиды, которые будут в дальнейшем использоваться в исследовании относительных уровней экспрессии селективных локусов карельской березы методом ПЦР в реальном времени.

Заключение. Полученные данные свидетельствуют о том, что методика высокопроизводительного секвенирования является перспективной для поиска селективных локусов, связанных с активностью клеток камбиальной зоны ствола высших растений. В данном случае были детектированы гены, связанные с клеточной дифференциацией, организацией клеточной стенки, лигнификацией и углеводным обменом. В дальнейшем полученные селективные локусы будут изучены на предмет активности транскрипции в клетках камбиальной зоны ствола карельской березы и березы повислой.

Список литературы

1. Fukuda H. Xylogenesis: initiation, progression, and cell death // Annu. Rev. Plant. Physiol. Plant. Mol. Biol. 1996. Vol. 47. P. 299–325. DOI: 10.1146/annurev.arplant.47.1.299.

2. Menard D., Serk H., Decou R., Pesquet E. Establishment and utilization of habituated cell suspension cultures for hormone-inducible xylogenesis // Methods in Molecular Biology. 2017. Vol. 1544. P. 37–57. DOI: 10.1007/978-1-4939-6722-3_4.

3. Dziedzic J. A., McDonald A. G. Mass spectrometry data for in vitro protein profiles in early and late stages of Douglas-fir xylogenesis // Data in Brief. 2016. Vol. 7. P. 1048–1051.

4. Новицкая Л. Л. Механизмы регуляции развития тканей ствола древесных растений на примере карельской березы // Труды Карельского научного центра РАН. 2003. Вып. 5. С. 74–84.

5. Баранов О. Ю., Кирьянов П. С., Пантелеев С. В., Можаровская Л. В., Падутов А. В., Разумова О. А., Падутов В. Е. Анализ структурно-функциональной организации хлоропластного генома карельской березы на основании данных высокопроизводительного секвенирования // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. 2019. Т. 63, № 3. С. 312–316. DOI: 10.29235/1561-8323-2019-63-3-312-316.

6. Мощенская Ю. Л., Галибина Н. А., Топчиева Л. В., Новицкая Л. Л. Экспрессия генов, кодирующих изоформы сахарозосинтазы, в ходе аномального ксилогенеза карельской березы // Физиология растений. 2017. Т. 64, № 4. С. 301–310.

7. Галибина Н. А., Новицкая Л. Л., Красавина М. С., Мощенская Ю. Л. Активность инвертазы в тканях ствола карельской березы // Физиология растений. 2015. Т. 62, № 6. С. 804–813.

8. Lopez-Bucio J., Hernandez-Abreu E., Sanchez-Calderon L., Perez-Torres A., Rampey R. A., Bartel B., Herrera-Estrella L. An auxin transport independent pathway is involved in phosphate stress-induced root architectural alterations in arabidopsis. Identification of BIG as a mediator o auxin in pericycle cell activation // Plant Physiology. 2005. Vol. 137. P. 681–691. DOI: 10.1104/pp.104.049577.

9. Marhavy P., Bielach A., Abas L., Abuzeineh A., Duclercq J., Tanaka H., Parezova M., Petrasek J., Friml J., Kleine-Vehn J., Benkova E. Cytokinin modulates endocytic trafficking of PIN1 auxin efflux carrier to control plant organogenesis // Developmental Cell. 2011. Vol. 21, No. 4. P. 796–804. DOI:10.1016/j.devcel.2011.08.014.

10. Tabata R., Ikezaki M., Fujibe T., Aida M., Tian C., Ueno Y., Yamamoto K. T., Machida Y., Nakamura K., Ishiguro S. Arabidopsis auxin response factor6 and 8 regulate jasmonic acid biosynthesis and floral organ development via repression of class 1 KNOX genes // Plant and Cell Physiology. 2009. Vol. 51, No. 1. P. 164–175. DOI:10.1093/pcp/pcp176.

11. Arase F., Nishitani H., Egusa, M., Nishimoto N., Sakurai S., Sakamoto N., Kaminaka H. IAA8 involved in lateral root formation interacts with the TIR1 auxin receptor and ARF transcription factors in Arabidopsis // PLoS ONE. 2012. Vol. 7, No. 8. e43414. DOI:10.1371/journal.pone.0043414.

12. Saleme M. de L. S., Cesarino I., Vargas L., Kim H., Vanholme R., Goeminne G., Acker R., Fonseca F. C., Pallidis A., Voorend W., Nicomedes J., Padmakshan D., Doorsseleare J., Ralph J., Boerjan W. Silencing caffeoyl shikimate esterase affects lignification and improves saccharification in Poplar // Plant Physiology. 2017. Vol. 175, No. 3. P. 1040–1057. DOI:10.1104/pp.17.00920.

13. Halpin C., Knight M. E., Foxon G. A., Campbell M. M., Boudet A. M., Boon J. J., Chabbert B., Tollier M., Schuch W. Manipulation of lignin quality by downregulation of cinnamyl alcohol dehydrogenase // The Plant Journal. 1994. Vol. 6, No. 3. P. 339–350. DOI:10.1046/j.1365-313x.1994.06030339.x.

14. Trabucco G. M., Matos D. A., Lee S. J., Saathoff A. J., Priest H. D., Mockler T. C., Sarath G., Hazen S. P. Functional characterization of cinnamyl alcohol dehydrogenase and caffeic acid O-methyltransferase in Brachypodium distachyon // BMC Biotechnology. 2013. Vol. 13. P. 2–18. DOI:10.1186/-1472-6750-13-61.

15. Taylor N. G., Laurie S., Turner S. R., Multiple cellulose synthase catalytic subunits are required for cellulose synthesis in Arabidopsis // The plant cell. 2000. Vol. 12, No. 12. P. 2529–2540. DOI:10.1105/tpc.12.12.2529.

16. Sterling J. D., Atmodjo M. A., Inwood S. E., Kumar Kolli V. S., Quigley H. F., Hahn M. G., Mohnen D. Functional identification of an Arabidopsis pectin biosynthetic homogalacturonan galacturonosyltransferase // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2006. Vol. 103, No. 13. P. 5236–5241. DOI:10.1073/pnas.0600120103.

17. Liwanag A. J. M., Ebert B., Verhertbruggen Y., Rennie E. A., Rautengarten C., Oikawa A., Andersen M. C. F., Clausen M. H., Scheller H. V. Pectin Biosynthesis: GALS1 in Arabidopsis thaliana Is a β-1,4-Galactan β-1,4-Galactosyltransferase // The Plant Cell. 2012. Vol. 24, No. 12. P. 5024–5036. DOI:10.1105/tpc.112.106625.

18. Мощенская Ю. Л., Галибина Н. А., Никерова К. М., Новицкая Л. Л. Активность ферментов диссимиляции сахарозы в раннем онтогенезе разных форм березы повислой // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. No. 11. С. 78–87. DOI: 10.17076/eb461.

19. Filyushin M. A., Kochieva E. Z., Shchennikova A. V., Beletsky A. V., Mardanov A. V., Ravin N. V., Skryabin, K. G. SWEET uniporter gene family expression profile in the pitcher development in the carnivorous plant Nepenthes sp. // Russian Journal of Genetics. 2019. Vol. 55, No. 6. P. 692–700.

20. Smirnova J., Fernie A. R., Spahn C. M. T., Steup M. Photometric assay of maltose and maltose-forming enzyme activity by using 4-alpha-glucanotransferase (DPE2) from higher plants // Analytical Biochemistry. 2017. Vol. 532. P. 72–82. DOI:10.1016/j.ab.2017.05.026.

21. Plaxton W. C. The organization and regulation of plant glycolysis // Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology. 1996. Vol. 47, No. 1. P. 185–214. DOI: 10.1146/annurev.arplant.47.1.185.

22. Wang T., Sui Z., Liu X., Li Y., Li H., Xing J., Song F., Zhang Y., Sun Q., Ni Z. Ectopic expression of a maize hybrid up-regulated gene, ErbB-3 binding Protein 1 (ZmEBP1), increases organ size by promoting cell proliferation in Arabidopsis // Plant Science. 2016. Vol. 243. P. 23–34.

23. Ohashi-Ito K., Fukuda H. HD-Zip III Homeobox genes that include a novel member, ZeHB-13 (Zinnia)/ATHB-15 (Arabidopsis), are involved in procambium and xylem cell differentiation // Plant and Cell Physiology. 2003. Vol. 44, No. 12. P. 1350–1358. DOI: 10.1093/pcp/pcg164.

24. Atkinson R. G., Johnston S. L., Yauk Y. K., Sharma N. N., Schröder R. Analysis of xyloglucan endotransglucosylase/hydrolase (XTH) gene families in kiwifruit and apple // Postharvest Biology and Technology. 2009. Vol. 51, No. 2. P. 149–157. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2008.06.014.

25. Liu P.-L., Du L., Huang Y., Gao S.-M., Yu M. Origin and diversification of leucine-rich repeat receptor-like protein kinase (LRR-RLK) genes in plants // BMC Evolutionary Biology. 2017. Vol. 17. P. 2–16. DOI:10.1186/s12862-017-0891-5.

26. Zhang, Y., Yang, J., Showalter, A. M. AtAGP18, a lysine-rich arabinogalactan protein in Arabidopsis thaliana, functions in plant growth and development as a putative co-receptor for signal transduction // Plant Signaling & Behavior. 2001. Vol. 6, No. 6. P. 855–857. DOI:10.4161/psb.6.6.15204.

References

1. Fukuda H. Xylogenesis: initiation, progression, and cell death. *Annu. Rev. Plant. Physiol. Plant. Mol. Biol*., 1996, vol. 47, pp. 299–325. DOI: 10.1146/annurev.arplant.47.1.299.

2. Menard D., Serk H., Decou R., Pesquet E. Establishment and utilization of habituated cell suspension cultures for hormone-inducible xylogenesis. *Methods in Molecular Biology*, 2017, vol. 1544, pp. 37–57. DOI: 10.1007/978-1-4939-6722-3_4.

3. Dziedzic J. A., McDonald A. G. Mass spectrometry data for in vitro protein profiles in early and late stages of Douglas-fir xylogenesis. *Data in Brief*, 2016, vol. 7, pp. 1048–1051.

4. Novickaya L. L. The mechanisms of regulation of tissue development of the trunk of woody plants on the example of Karelian birch. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2003, vol. 5, pp. 74–84 (In Russian).

5. Baranov O. Ju., Kir'yanov P. S., Panteleev S. V., Mozharovskaya L. V., Padutov A. V., Razumova O. A., Padutov V. E. Analysis of structural and functional organization of the curly birch chloroplast genome based on the next-generation sequencing data. *Dokl. Nats. akad. nauk Belarusi* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus], 2019, vol. 63, no. 3, pp. 312–316. DOI: 10.29235/1561-8323-2019-63-3-312-316.6.

6. Moshhenskaya Yu. L., Galibina N. A., Topchieva L. V., Novickaya L. L. Expression of genes encoding sucrose synthase isoforms during abnormal xylogenesis of Karelian birch. *Fiziologiya rasteniy* [Plant physiology], 2017, vol. 64, no. 4, pp. 301–310 (In Russian).

7. Galibina N. A., Novickaya L. L., Krasavina M. S., Moshhenskaya Ju. L. Invertase activity in the tissues of the trunk of the Karelian birch. *Fiziologiya rasteniy* [Plant physiology], 2015, vol. 62, no. 6, pp. 804–813 (In Russian).

8. Lopez-Bucio J., Hernandez-Abreu E., Sanchez-Calderon L., Perez-Torres A., Rampey R. A., Bartel B., Herrera-Estrella L. An auxin transport independent pathway is involved in phosphate stress-induced root architectural alterations in arabidopsis. Identification of BIG as a mediator o auxin in pericycle cell activation. *Plant Physiology*, 2005, vol. 137, pp. 681–691. DOI: 10.1104/pp.104.049577.

9. Marhavy P., Bielach A., Abas L., Abuzeineh A., Duclercq J., Tanaka H., Parezova M., Petrasek J., Friml J., Kleine-Vehn J., Benkova E. Cytokinin modulates endocytic trafficking of PIN1 auxin efflux carrier to control plant organogenesis. *Developmental Cell*, 2011, vol. 21, no. 4, pp. 796–804. DOI:10.1016/j.devcel.2011.08.014.

10. Tabata R., Ikezaki M., Fujibe T., Aida M., Tian C., Ueno Y., Yamamoto K. T., Machida Y., Nakamura K., Ishiguro S. Arabidopsis auxin response factor6 and 8 regulate jasmonic acid biosynthesis and floral organ development via repression of class 1 KNOX genes. *Plant and Cell Physiology*, 2009, vol. 51, no. 1, pp. 164–175. DOI:10.1093/pcp/pcp176.

11. Arase F., Nishitani H., Egusa, M., Nishimoto N., Sakurai S., Sakamoto N., Kaminaka H. IAA8 involved in lateral root formation interacts with the TIR1 auxin receptor and ARF transcription factors in Arabidopsis. *PLoS ONE*, 2012, vol. 7, no. 8, e43414. DOI:10.1371/journal.pone.0043414.

12. Saleme M. de L. S., Cesarino I., Vargas L., Kim H., Vanholme R., Goeminne G., Acker R., Fonseca F. C., Pallidis A., Voorend W., Nicomedes J., Padmakshan D., Doorsseleare J., Ralph J., Boerjan W. Silencing caffeoyl shikimate esterase Affects lignification and improves saccharification in Poplar. *Plant Physiology*, 2017, vol. 175, no. 3, pp. 1040–1057. DOI:10.1104/pp.17.00920.

13. Halpin C., Knight M. E., Foxon G. A., Campbell M. M., Boudet A. M., Boon J. J., Chabbert B., Tollier M., Schuch W. Manipulation of lignin quality by downregulation of cinnamyl alcohol dehydrogenase. *The Plant Journal*, 1994, vol. 6, no. 3, pp. 339–350. DOI:10.1046/j.1365-313x.1994.06030339.x.

14. Trabucco G. M., Matos D. A., Lee S. J., Saathoff A. J., Priest H. D., Mockler T. C., Sarath G., Hazen S. P. Functional characterization of cinnamyl alcohol dehydrogenase and caffeic acid O-methyltransferase in Brachypodium distachyon. *BMC Biotechnology*, 2013, vol. 13, pp. 2–18. DOI:10.1186/1472-6750-13-61.

15. Taylor N. G., Laurie S., Turner S. R. Multiple cellulose synthase catalytic subunits are required for cellulose synthesis in Arabidopsis. *The Plant Cell*, 2000, vol. 12, no. 12, pp. 2529–2540. DOI:10.1105/tpc.12.12.2529.

16. Sterling J. D., Atmodjo M. A., Inwood S. E., Kumar Kolli V. S., Quigley H. F., Hahn M. G., Mohnen D. Functional identification of an Arabidopsis pectin biosynthetic homogalacturonan galacturonosyltransferase. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, vol. 103, no. 13, pp. 5236–5241. DOI:10.1073/pnas.0600120103.

17. Liwanag A. J. M., Ebert B., Verhertbruggen Y., Rennie E. A., Rautengarten C., Oikawa A., Andersen M. C. F., Clausen M. H., Scheller H. V. Pectin Biosynthesis: GALS1 in Arabidopsis thaliana Is a β-1,4-Galactan β-1,4-Galactosyltransferase. *The Plant Cell*, 2012, vol. 24, no. 12, pp. 5024–5036. DOI:10.1105/tpc.112.106625.

18. Moshhenskaja Ju. L., Galibina N. A., Nikerova K. M., Novickaya L. L. The activity of sucrose dissimilation enzymes in the early ontogenesis of various forms of birch. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2016, no. 11, pp. 78–87. DOI: 10.17076/eb461.

19. Filyushin M. A., Kochieva E. Z., Shchennikova A. V., Beletsky A. V., Mardanov A. V., Ravin N. V., Skryabin, K. G. SWEET uniporter gene family expression profile in the pitcher development in the carnivorous plant Nepenthes sp. *Russian Journal of Genetics*, 2019, vol. 55, no. 6, pp. 692–700.

20. Smirnova J., Fernie A. R., Spahn C. M. T., Steup M. Photometric assay of maltose and maltose-forming enzyme activity by using 4-alpha-glucanotransferase (DPE2) from higher plants. *Analytical Biochemistry*, 2017, vol. 532, pp. 72–82. doi:10.1016/j.ab.2017.05.026.

21. Plaxton W. C. The organization and regulation of plant glycolysis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1996, vol. 47, no. 1, pp. 185–214. DOI: 10.1146/annurev.arplant.47.1.185.

22. Wang T., Sui Z., Liu X., Li Y., Li H., Xing J., Song F., Zhang Y., Sun Q., Ni Z. Ectopic expression of a maize hybrid up-regulated gene, ErbB-3 binding Protein 1 (ZmEBP1), increases organ size by promoting cell proliferation in Arabidopsis. *Plant Science*, 2016, vol. 243, pp. 23–34.

23. Ohashi-Ito K., Fukuda H. HD-Zip III Homeobox genes that include a novel member, ZeHB-13 (Zinnia)/ATHB-15 (Arabidopsis), are involved in procambium and xylem cell differentiation. *Plant and Cell Physiology*, 2003, vol. 44, no. 12, pp. 1350–1358. DOI: 10.1093/pcp/pcg164.

24. Atkinson R. G., Johnston S. L., Yauk Y. K., Sharma N. N., Schröder R. Analysis of xyloglucan endotransglucosylase/hydrolase (XTH) gene families in kiwifruit and apple. *Postharvest Biology and Technology*, 2009, vol. 51, no. 2, pp. 149–157. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2008.06.014.

25. Liu P.-L., Du L., Huang Y., Gao S.-M., Yu M. Origin and diversification of leucine-rich repeat receptor-like protein kinase (LRR-RLK) genes in plants. *BMC Evolutionary Biology*, 2017, vol. 17, pp. 2–16. DOI:10.1186/s12862-017-0891-5.

26. Zhang, Y., Yang, J., Showalter, A. M. AtAGP18, a lysine-rich arabinogalactan protein in Arabidopsis thaliana, functions in plant growth and development as a putative co-receptor for signal transduction. *Plant Signaling & Behavior*, 2001, vol. 6, no. 6, pp. 855–857. DOI:10.4161/psb.6.6.15204.

Информация об авторе

Кирьянов Павел Сергеевич – младший научный сотрудник. Институт леса Национальной академии наук Беларуси (246050, г. Гомель, ул. Пролетарская, 71, Республика Беларусь). E-mail: PKirjanov@yandex.ru

Information about the author

Kir'yanov Pavel Sergeevich – Junior Researcher. Institute of Forest of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: PKirjanov@yandex.ru

УДК 630*232:630*235.6

Н. И. Якимов, В. К. Гвоздев, А. В. Юреня
Белорусский государственный технологический университет

ОПЫТ РЕКОНСТРУКЦИИ МАЛОЦЕННЫХ НАСАЖДЕНИЙ ЛЕСНЫМИ КУЛЬТУРАМИ ЕЛИ ЕВРОПЕЙСКОЙ

Исследования проводились в реконструктивных культурах, заложенных в 2008 г. коридорным способом в малоценном березовом насаждении. Реконструкция молодняка проводилась путем устройства коридоров шириной 2, 4, 6 м. В качестве посадочного материала использовались 4-летние саженцы ели европейской. В двухметровых коридорах высаживался 1 ряд ели, в четырехметровых – 2 ряда, в шестиметровых – 3 ряда. Шаг посадки в ряду составлял в среднем 1,0–1,2 м.

Через два года после создания культур, когда ель вступила в фазу быстрого роста, было произведено изреживание лесных кулис с удалением 50–60% деревьев мягколиственных пород и оставлением в кулисах подроста сосны обыкновенной и ели европейской. В результате состав естественного возобновления в кулисах изменился в сторону увеличения участия деревьев сосны и ели.

Через 4 года после посадки культуры ели сомкнулись в рядах, смыкание в междурядьях составило 70–80%, общая сохранность деревьев в коридорах варьировала от 80 до 90%. Высота культур в зависимости от варианта опыта колебалась в пределах 1,42–1,68 м, а диаметр ствола у корневой шейки – 2,5–3,6 см.

Через 11 лет после создания в зависимости от ширины коридоров высота культур ели варьирует от 5,1 до 6,2 м, а средний диаметр на высоте груди составляет 5,3–6,6 см. Сохранность культур ели в коридорах колеблется от 62 до 80%. Наибольшая продуктивность насаждения наблюдается при реконструкции коридорами шириной 6 м с оставлением кулис такой же ширины. При таком способе реконструкции запас ели в коридорах составляет 34 м^3/га, а общий запас насаждения с учетом пород в кулисе между коридорами равен 78 м^3/га.

Ключевые слова: реконструкция насаждений, коридорный способ, культуры ели, сохранность, продуктивность.

N. I. Yakimov, V. K. Gvozdev, A. V. Yurenya
Belarusian State Technological University

EXPERIENCE IN RECONSTRUCTION OF LOW-VALUE FOREST PLANTATIONS OF EUROPEAN SPRUCE

The research was carried out in reconstructive cultures laid down in 2008 by the corridor method in a low-value birch plantation. Reconstruction of young animals was carried out by building corridors with a width of 2, 4, 6 meters. 4-year-old seedlings of European spruce were used as planting material. In two – meter corridors, 1 row of fir trees was planted, in four-meter corridors – 2 rows, in six-meter corridors – 3 rows. The landing step in a row averaged 1.0–1.2 m.

Two years after the creation of the crops, when the spruce entered a phase of rapid growth, the forest scenes were thinned with the removal of 50–60% of soft-leaved trees and the abandonment of common pine and European spruce in the scenes. As a result, the composition of natural regeneration in the wings has changed in the direction of increasing the participation of pine and spruce trees.

4 years after planting, spruce crops closed in rows, closing in the aisles was 70–80%, and the overall safety of trees in the corridors varied from 80 to 90%. The height of the crops, depending on the variant of the experiment, ranged from 1.42–1.68 m, and the diameter of the trunk at the root neck – 2.5–3.6 cm.

11 years after creation, depending on the width of the corridors, the height of spruce crops varies from 5.1 m to 6.2 m, and the average diameter at chest height is 5.3–6.6 cm. the preservation of spruce crops in the corridors ranges from 62 to 80%. The greatest productivity of planting is observed during the reconstruction of corridors with a width of 6 m and leaving the wings of the same width. With this method of reconstruction, the spruce stock in the corridors is 34 m^3/ha, and the total planting stock, taking into account the rocks in the backstage between the corridors, is 78 m^3/ha.

Key words: reconstruction of plantings, corridor method, spruce culture, safety, productivity.

Введение. После сплошных рубок главного пользования возможна смена хозяйственно ценных хвойных древостоев на малоценные мелколиственные с большой долей участия березы, осины, ивы. Лесные культуры хвойных пород часто погибают по причинам нарушения технологии их создания и отсутствия уходов за ними. Это происходит из-за интенсивного развития

травянистой растительности и конкуренции со стороны быстрорастущих мелколиственных пород. По данным многих авторов, в связи с несвоевременным и некачественным уходом в возрасте до 10 лет гибнет около 25% культур [1].

Одним из путей восстановления насаждений ценных древесных пород является их реконструкция. При этом реконструируемое насаждение сохраняет свойственные лесной среде микроклиматические и экологические условия. От проведения мероприятий по реконструкции прирост древесины за счет хозяйственно ценных пород может увеличиться в 2–2,5 раза, а замена малоценных лиственных насаждений культурами хвойных и твердолиственных пород повышает производительность лесных земель на 30–40% [2]. Кроме того, проведение реконструкции малоценных насаждений значительно улучшает породную структуру лесов.

В Беларуси большой вклад в разработку способов реконструкции внес в 50–60-е гг. прошлого столетия заведующий кафедрой лесных культур Белорусского технологического института им. С. М. Кирова профессор Мирон К. Ф. Он рассматривал реконструкцию как лесокультурное мероприятие, при котором главная порода искусственно вводится в состав молодняков естественного происхождения, не отвечающих лесоводственным требованиям. Исходя из лесорастительных условий местопроизрастания реконструируемых насаждений, их породного состава, возраста, высоты, состояния, а также с учетом биологических свойств вводимых пород им были разработаны пять способов реконструкции: коридорно-луночный, коридорно-гнездовой, коридорно-кулисный, коридорно-кулисно-звеньевой, а также способ густых культур местами [3]. По мере накопления опыта проведения реконструкции малоценных насаждений, появления новых механизмов по проведению реконструктивных рубок и обработки почвы были разработаны новые технологии и способы проведения реконструкции. Согласно нормативным документам в республике применяются следующие способы проведения реконструкции малоценных насаждений: коридорный, куртинно-групповой, сплошной [4].

В Российской Федерации наблюдаются несколько другие подходы к реконструкции малоценных насаждений и выделяют следующие способы реконструкции: сплошная, полосная 2–3-приемная, коридорная, котловинная, куртинная, групповая или террасная [5].

При небольшой высоте естественного возобновления лиственных пород возможна реконструкция малоценных насаждений посредством создания лесных культур путем нарезки борозд с дальнейшей посадкой ели. В этом случае расстояние между центрами борозд составляет 10–11 м, что позволяет увеличить площадь, занятую хвойными породами, от 25 до 41% [6]. Одним из способов восстановления хозяйственно ценных насаждений является применение химической подсушки лиственных пород в кулисах путем инъекции гербицидов в стволы деревьев [7].

Наиболее распространенным способом реконструкции является коридорный, при котором ширина коридоров должна быть не менее, а ширина кулис – не более показателя максимальной высоты реконструируемого малоценного лесного насаждения [4].

Тем не менее имеются разные мнения по влиянию ширины коридоров на рост реконструктивных культур. По данным Кабановой С. А. наиболее оптимальным для роста и развития лесных культур сосны являлся вариант с шириной коридоров 8 м [8]. Гаврилов В. Н. указывает, что лучшие условия для роста ели складываются в коридорах, ширина которых равна 7 м и близка к величине средней высоты реконструируемого древостоя. В 3-метровых коридорах при данной высоте уже к 15-летнему возрасту культур кроны берез, оставленных в кулисах, практически смыкаются над посадками ели, снижая освещенность последних и тем самым замедляя темпы ее роста [9].

После посадки реконструктивных культур особое значение приобретают не только проведение уходов за ними, но и своевременное изреживание деревьев в оставляемых кулисах с целью недопущения отенения и заглушения высаженных культур. Ранее проведенными исследованиями установлено, что в зависимости от интенсивности и периодичности проведения рубок ухода в кулисах, а следовательно, и количества оставляемых пород возможны различные варианты формирования смешанных насаждений [10, 11].

Основная часть. Для изучения успешности роста реконструктивных культур ели европейской в зависимости от ширины коридоров в Негорельском учебно-опытном лесхозе в 2008 г. был заложен опытный объект площадью 2,5 га, на котором произошло естественное возобновление березой, ивами, осиной. В составе малоценного молодняка присутствовало и естественное возобновление сосны обыкновенной в количестве 12%. Средняя высота возобновления мягколиственных пород составляла 5–6 м, а средний диаметр – 5,5 см. Почва на участке дерново-подзолистая глееватая песчаная, развивающаяся на песке связном, подстилаемая с глубины 1 м суглинком моренным. Тип условий местопроизрастания – B_3.

Реконструкция насаждения проводилась путем устройства коридоров шириной 2, 4, 6 м. Прокладка коридоров осуществлялась лесной фрезой Seppi M, агрегатируемой с трактором МТЗ-1221. За один проход фрезы образовывался коридор шириной 2 м, а ширина оставляемых кулис между коридорами примерно была равна высоте реконструируемого молодняка и во всех вариантах составляла примерно 5–6 м. В качестве посадочного материала использовались 4-летние саженцы ели европейской, которые высаживались под лопату. В 2-метровых коридорах высаживался 1 ряд растений, в 4-метровых – 2 ряда, в 6-метровых – 3. Шаг посадки в ряду составлял в среднем около 1,0–1,2 м. Использование лесной фрезы обеспечивало высокое качество поверхностной обработки почвы с измельчением древесины стволов и корней деревьев не только на ее поверхности, но и на глубине 5–10 см. Поэтому при такой технологии возможно широкое применение лесопосадочных машин для создания лесных культур.

Через два года после создания культур, когда ель вступила в фазу быстрого роста, было произведено изреживание лесных кулис с удалением 50–60% деревьев мягколиственных пород и оставлением в кулисах деревьев сосны обыкновенной и ели европейской. В результате состав естественного возобновления в кулисах изменился в сторону увеличения участия деревьев сосны и ели и в настоящее время составляет 7С2Е1Б (табл. 1).

Через 4 года после посадки культуры ели сомкнулись в рядах, смыкание в междурядьях составило 70–80%, общая сохранность деревьев в коридорах варьировала от 80 до 90%. Высота культур в зависимости от варианта опыта колебалась в пределах 1,42–1,68 м, а диаметр стволиков у корневой шейки – 2,5–3,6 см (табл. 2).

Через 11 лет после создания в 2019 г. в зависимости от ширины коридоров высота культур ели варьирует от 5,1 до 6,2 м, а средний диаметр на высоте груди составляет 5,3–6,6 см. Сохранность культур ели в коридорах по-прежнему остается высокой и составляет 62–80%. Анализ данных табл. 2 показывает, что тенденция лучшего роста культур ели в более широких коридорах продолжает сохраняться. Более высокие показатели роста наблюдаются у культур ели, высаженных в коридорах шириной 4 и 6 м. В узких 2-метровых коридорах средний диаметр и средняя высота ели меньше, чем в более широких коридорах. Наилучшие показатели роста отмечаются в широких коридорах с тремя рядами ели. Здесь средняя высота культур ели составляет 6,2 м, а средний диаметр – 6,6 см.

Продуктивность реконструктивных культур также является различной в зависимости от ширины коридоров (табл. 3). Наименьший запас древесины наблюдается в варианте с однорядной посадкой ели в 2-метровом коридоре. Запас ели в коридорах здесь составляет 10 м^3/га, а общий запас с учетом пород в межкоридорной кулисе равен 66 м^3/га.

Несколько лучшие результаты получены при реконструкции насаждения 4-метровыми коридорами. Здесь уже запас ели в коридорах составляет 17 м^3/га, а общий запас реконструированного насаждения – 70 м^3/га.

Таблица 1

Характеристика деревьев в лесных кулисах реконструктивных культур

Порода	Коэффициент участия, %	Средние		Количество деревьев, шт./га	Запас, стволовой древесины, м^3/га
		высота, м	диаметр, см		
Сосна обыкновенная	68	10,0	12,1	440	34
Ель европейская	24	9,5	10,2	260	12
Береза повислая	8	10,5	7,9	110	4

Таблица 2

Динамика показателей роста реконструктивных культур ели европейской

Ширина коридоров, м	Количество рядов ели в коридоре	Показатели роста культур					
		4-летние культуры			11-летние культуры		
		Высота, м	Диаметр стволика у корневой шейки, см	Сохранность, %	Высота, м	Диаметр, на высоте 1,3 м, см	Сохранность, %
2	1	1,42	2,5	80	5,1	5,3	74
4	2	1,68	3,6	90	5,7	5,8	62
6	3	1,60	3,2	86	6,2	6,6	80

Таблица 3

Запасы стволовой древесины в реконструированном насаждении культурами ели европейской

Ширина коридоров, м	Количество рядов ели в коридоре	Запас древесины ели в коридоре, $м^3$/га	Запасы стволовой древесины в межкоридорной кулисе, $м^3$/га			Общий запас, $м^3$/га
			Береза	Сосна	Ель	
2	1	10	10	36	10	66
4	2	17	1	39	13	70
6	3	34	1	29	14	78

Наибольшая продуктивность насаждения наблюдается при реконструкции коридорами шириной 6 м. Запас ели в коридорах здесь равен 34 $м^3$/га, а общий запас с учетом пород в межкоридорной кулисе составляет 78 $м^3$/га.

Результаты исследования роста реконструктивных культур в фазе, предшествующей смыканию, показали, что узкие коридоры (2 м) с однорядной посадкой ели с лесоводственной и экономической точки зрения не являются достаточно эффективными. В узких коридорах уже на второй год после посадки ощущается недостаток освещенности, так как крайние деревья кулис оттеняют коридоры. Кроме этого, в таких коридорах трудно механизировать агротехнический уход за культурами.

Заключение. Лучшие результаты при реконструкции малоценных молодняков коридорным методом достигаются посадкой укрупненных саженцев ели европейской с размещением между рядами 2,0–2,5 м и в ряду через 1,0–1,2 м по предварительно проложенным коридорам шириной 4–6 м лесной фрезой Seppi M. При таком размещении саженцев ели полное смыкание их крон наступает через 4–5 лет, а посадка прямолинейными рядами создает благоприятные условия для механизации агротехнических уходов (рыхления почвы, выкашивания сорняков и поросли). Через 11 лет после посадки культур наибольшая продуктивность насаждения наблюдается при реконструкции коридорами шириной 6 м с оставлением кулис такой же ширины. Запас ели в коридорах здесь составляет 34 $м^3$/га, а общий запас насаждения с учетом пород в межкоридорной кулисе равен 78 $м^3$/га. В целом следует отметить, что, несмотря на трудоемкость и сложность проведения, реконструкция малоценных молодняков позволяет улучшить породный состав лесов, повысить эффективность использования лесных земель и увеличить продуктивность насаждений.

Список литературы

1. Калиниченко А. И., Писаренко А. И., Смирнов Н. А. Лесовосстановление на вырубках. М.: Экология, 1991. 382 с.

2. Якимов Н. И., Турлюк В. Д., Филон Д. И. Реконструкция малоценных насаждений методом лесных культур в Негорельском учебно-опытном лесхозе // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2010. Вып. XVIII. С. 188–190.

3. Мирон К. Ф. Мероприятия по реконструкции малоценных молодняков в лесах БССР. Минск: Изд-во АН БССР, 1952. 36 с.

4. Положение о порядке лесовосстановления и лесоразведения: постановление Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь, 19.12.2016, № 80 [Электронный ресурс] URL: http://law.by/upload/docs/op/W21631578_1484254800.pdf. (дата обращения: 13.01.2020).

5. Чернышов М. П., Тувышкина М. А., Куприн Ю. И., Азон Э. С. Основы проектирования реконструкции малоценных насаждений при лесоустройстве // Лесотехнический журнал. № 1 (21). 2016. С. 72–84.

6. Карбасникова Е. Б. Влияние реконструкции малоценных насаждений на гидромелиоративных системах на экологические условия среды в Кадниковском лесхозе Вологодской области // Молочнохозяйственный вестник. 2014. № 2 (14). С. 22–29.

7. Ильин В. П., Иванов А. М., Подшиваев Е. Е. Реконструкция малоценных лиственных молодняков с применением химического метода в целях формирования хвойных древостоев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2015. Вып. 213. С. 29–39.

8. Кабанова С. А. Изучение лесных культур сосны, созданных в процессе реконструкции малоценных насаждений в государственном национальном природном парке «Бурабай» // Вестник Томского университета. 2011. № 347. С. 162–165.

9. Гаврилов В. Н. Выращивание ели европейской (Picea abies Karst.) при реконструкции осушаемого березняка осоково-сфагнового // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2013. № 2: Сельскохозяйственные науки. С. 55–58.

10. Кронит Я. Я. Реконструкция малоценных насаждений в Латвии // Лесное хозяйство. 1968. Вып. 5. С. 70–72.

11. Чмыр А. Ф. Структура и экология вторичных лиственных лесов на вырубках и их реконструкция. СПб.: СПбНИИЛХ, 2002. 232 с.

References

1. Kalinichenko A. I., Pisarenko A. I., Smirnov N. A. *Lesovosstanovlenie na vyrubkakh* [Reforestation at fellings]. Moscow, Ecologiya Publ., 1991. 382 p.

2. Yakimov N. I., Turlyuk V. D., Filon D. I. Reconstruction of low-value plantations using the forest crop method in the Negoreloe training and experimental forestry. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series I, Forestry, 2010, issue XVIII, pp. 188–190 (In Russian).

3. Miron K. F. *Meropriyatiya po rekonstruktsii malotsennykh molodnyakov v lesakh BSSR* [Measures for the reconstruction of low-value young growth in the forests of the BSSR]. Minsk, AS BSSR Publ. 1952. 36 p.

4. *Pologenie o poryadke lesovosstanovleniya i lesorazvedeniya. Postanovlenie Ministerstva lesnogo khozyaystva Respubliki Belarus'* [Regulations on the procedure of reforestation and afforestation: Decree of the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus 19.12.2016. no. 80]. Available at: http://law.by/upload/docs/op/W21631578_1484254800.pdf. (accessed 13.01.2020).

5. Chernyshov M. P., Tuvychkina M. A., Kuprin Yu. I., Azon E. S. Fundamentals of designing reconstruction of low-value plantations during forest management. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forestry journal], 2016, no. 1 (21), 2016, pp. 72–84 (In Russian).

6. Karbasnikova E. B. The influence of reconstruction of low-value plantations on irrigation and drainage systems on the environmental conditions in Kadnikov forestry of the Vologda region. *Molochnokhozyaystvennyy vestnik* [Dairy newsletter], 2014, no. 2 (14), pp. 22–29 (In Russian).

7. Il'in V. P., Ivanov A. M., Podshivaev E. E. Reconstruction of low-value deciduous young growth using the chemical method to form coniferous stands. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotechnicheskoy akademii* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy], 2015, issue 213, pp. 29–39 (In Russian).

8. Kabanova S. A. The study of pine forest crops created in the process of reconstruction of low-value plantations in the state national natural park Burabay. *Vestnik Tomskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk University], 2011, no. 347, pp. 162–165 (In Russian).

9. Gavrilov V. N. Cultivation of European spruce (Picea abies Karst.) During the reconstruction of the drained birch forest of sedge-sphagnum. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific notes of Petrozavodsk State University], 2013, no. 2, Agricultural sciences, pp. 55–58 (In Russian).

10. Kronit Ya. Ya. Reconstruction of low-value stands in Latvia. *Lesnoe khozyaystvo* [Forestry], 1968, issue 5, pp. 70–72 (In Russian).

11. Chmyr A. F. *Struktura i ekologiya vtorichnykh listvennykh lesov na vyrubkakh i ikh rekonstruktsiya* [The structure and ecology of secondary deciduous forests on clearings and their reconstruction]. St. Petersburg, SPbNIIF Publ., 2002. 232 p.

Информация об авторах

Якимов Николай Игнатьевич − кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: yakimov@belstu.by

Гвоздев Валерий Кириллович − кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: gvozdev@belstu.by

Юреня Андрей Владимирович − кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: urenya@belstu.by

Information about the authors

Yakimov Nikolay Ignat'yevich − PhD (Agriculture), Assistant Professor, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yakimov@belstu.by

Gvozdev Valeriy Kirillovich − PhD (Agriculture), Assistant Professor, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gvozdev@belstu.by

Yurenya Andrey Vladimirovich − PhD (Agriculture), Assistant Professor, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: urenya@belstu.by

Поступила 19.02.2020

ЛЕСОЗАЩИТА И САДОВО-ПАРКОВОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 632.772 (476-21)

М. В. Волосач
Белорусский государственный университет

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ПОВРЕЖДЕННОСТЬ СПИРЕИ ВАНГУТТА (*SPIRAEA* × *VANHOUTTEI* (BRIOT) ZABEL) ЛИЧИНКАМИ МИНИРУЮЩЕЙ МУХИ *AGROMYZA SPIRAEOIDEARUM* HERING, 1954 В ЗЕЛЕНЫХ НАСАЖДЕНИЯХ МИНСКА И ГОМЕЛЯ

На основании данных учетов 2019 г. в зеленых насаждениях г. Минска и г. Гомеля оценена площадь мин личинок спирейной минирующей мухи (*Agromyza spiraeoidearum* Hering, 1954; Diptera: Agromyzidae) на листовых пластинках спиреи Вангутта (*Spiraea* × *vanhouttei* (Briot) Zabel; Rosaceae), которая варьировала в диапазоне от 0,05 до 3,60 см^2 для Минска и от 0,08 до 4,63 см^2 для Гомеля при средних значениях (1,33±0,92) и (1,51±1,02) см^2 соответственно; наблюдаемые различия не были статистически достоверны. Значения показателя относительной площади поврежденной листовой поверхности растений для г. Минска находились в диапазоне от 1,68 до 64,70%, г. Гомеля – от 0,75 до 94,88%. С использованием непараметрических критериев Манна – Уитни и Колмогорова – Смирнова подтверждена статистическая достоверность различий (P = 0,0025 и P = 0,0009 соответственно), что определяется статистически достоверными различиями площади отдельных листовых пластинок экземпляров *S.* × *vanhouttei*, произрастающих в зеленых насаждениях данных городов.

Ключевые слова: декоративные кустарники, минеры, филлобионты, Agromyzidae.

M. V. Volosach
Belarusian State University

THE COMPARATIVE LEVEL OF DAMAGE CAUSED TO VANHOUTTE SPIREA (*SPIRAEA* × *VANHOUTTEI* (BRIOT) ZABEL) BY MINING FLY *AGROMYZA SPIRAEOIDEARUM* HERING, 1954 LARVAE IN GREEN AREAS OF MINSK AND GOMEL

Based on the data obtained in 2019 in green areas of Minsk and Gomel, the square of mines of the mining fly (*Agromyza spiraeoidearum* Hering, 1954; Diptera: Agromyzidae) larvae on Vanhoutte spirea (*Spiraea* × *vanhouttei* (Briot) Zabel; Rosaceae) leaf plates, which ranged from 0.05 cm^2 to 3.60 cm^2 for Minsk, and from 0.08 cm^2 to 4.63 cm^2 for Gomel, with an average value of (1.33 ± 0.92) cm^2 and (1.51 ± 1,02) cm^2, respectively; observed differences were not significant. The relative area of damaged leaf surface for Minsk ranged from 1.68 to 64.70%, for Gomel – from 0.75 to 94.88%. Using nonparametric Mann-Whitney and Kolmogorov-Smirnov criteria, their statistical reliability was confirmed (P = 0.0025 and P = 0.0009, respectively), it is determined by statistically significant differences in the square of individual leaf plates of *S.* × *vanhouttei* specimens growing in green areas of the cities.

Key words: ornamental shrubs, miners, phyllobionts, Agromyzidae.

Введение. Спиреи Вангутта (*Spiraea* × *vanhouttei* (Briot) Zabel), иволистная (*Spiraea salicifolia* L.), японская (*Spiraea japonica* L.f.) и другие представители рода *Spiraea* L. широко культивируются в качестве декоративных растений в Беларуси [1], как и в других странах умеренного климатического пояса. В Европе они стали вводиться в парковые и садовые насаждения более 250 лет назад [2].

Спирея Вангутта является гибридом *Spiraea trilobata* L. и *Spiraea cantoniensis* Lour, это листопадный кустарник высотой до 2 м с округлой

кроной [2], характеризуется обильным и продолжительным весенним периодом цветения (до 20 дней), цветки ярко-белые, собранные в зонтики. Листья также декоративны, имеют сизый оттенок, остаются на побегах вплоть до наступления поздней осени. Кроме высоких декоративных качеств, вид обладает устойчивостью к антропогенному прессу, зимостойкостью и нетребовательностью к влаге [1], что и обусловливает его повсеместное применение в зеленых насаждениях Беларуси – в создании изгородей, высоких бордюров, в солитерных и групповых посадках.

Спирейная минирующая муха (*Agromyza spiraeoidearum* Hering, 1954) – широко распространенный в Европе [3] представитель семейства минирующих мух (Agromyzidae). Личинки известны главным образом как эндобионтные филлофаги, которые питаются мезофиллом листьев, оставляя их эпидермис интактным. В результате формируются так называемые «мины» – пустоты в листьях в виде пятен, коридоров и т. д. Их форма, цвет, размещение экскрементов внутри мин и другие характеристики являются видоспецифичными и используются для идентификации минеров. Появление хорошо заметных мин на листьях сказывается на декоративных качествах спирей; при высокой плотности вредителя происходит преждевременная дефолиация растений.

Основная часть. Обследования посадок спиреи Вангутта проводились в вегетационный сезон 2019 г. в декоративных насаждениях Минска и Гомеля. Образцы поврежденных личинками минера листьев *S.* × *vanhouttei* рандомизированно отбирали с растений, произрастающих в разного типа зеленых насаждениях, и помещали в полиэтиленовые пакеты с застежкой zip-lock. Дальнейшую камеральную обработку собранного материала, включающую сушку листовых пластинок и их гербаризацию, осуществляли по общепринятой методике [4]. Объем выборок составил 63 и 76 экземпляров листовых пластинок спиреи Вангутта для Минска и Гомеля соответственно.

Изображения получали сканированием на планшетном сканере Epson Perfection 4180 Photo с разрешением 300 dpi, обрабатывали с помощью свободно распространяемого графического редактора ImageJ [5]. Полученные данные анализировали средствами программы PAST 4.1, использовали непараметрические критерии различий Манна – Уитни и Колмогорова – Смирнова.

Мины *A. spiraeoidearum* верхнесторонние, часто коллективные, крупные, начинающиеся относительно узким коридором и постепенно расширяющиеся в пятно; светлоокрашенные, экскременты в виде разбросанных гранул неправильной формы (рисунок), личинки окукливаются за пределами мины. В обработанных нами выборках мины находились на листе в единственном экземпляре.

Мина спирейной минирующей мухи (*Agromyza spiraeoidearum* Hering, 1954) на листовой пластинке спиреи Вангутта (*Spiraea* × *vanhouttei* (Briot) Zabel)

В результате анализа полученных данных было установлено, что площадь мин *A. spiraeoidearum* на листовых пластинках спиреи Вангутта варьировала в диапазоне от 0,05 до 3,60 см^2 для Минска и от 0,08 до 4,63 см^2 для Гомеля, при среднем значении для Минска – (1,33 ± 0,92) см^2 (здесь и далее указана стандартная ошибка среднего (±SE)), медиана, нижний и верхний квартили составили 1,42; 0,46 и 2,11 соответственно, для Гомеля – (1,51 ± 1,02) см^2, медиана, нижний и верхний квартили – 1,64; 0,50 и 2,25 соответственно. Наблюдаемые различия не были статистически достоверны. Значения коэффициента вариации данного параметра в обоих случаях были высоки, 69,01 и 67,52% соответственно, что может указывать как на присутствие в выборках мин личинок разных возрастов, так и на наличие коллективных мин наряду с индивидуальными.

Относительная поврежденность листовой поверхности растений варьировала в пределах от 1,68 до 64,70% для Минска и от 0,75 до 94,88% для Гомеля. При этом использование непараметрических критериев различий Манна – Уитни и Колмогорова – Смирнова подтвердило статистическую достоверность различий значений данного показателя для зеленых насаждений данных городов (P = 0,0025 и P = 0,0009 соответственно). Связаны они со статистически достоверными различиями площади листовых пластинок выборок из Гомеля и Минска (P = = 0,003 и P = 0,001 соответственно), а не площади отдельных мин (P = 0,0353 и P = 0,65 соответ-

ственно). Таким образом, наблюдаемые различия определяются особенностями не биоэкологии самого минера, а кормового растения – спиреи Вангутта.

Заключение. На основании анализа выборок поврежденных личинками спирейной минирующей мухи (*Agromyza spiraeoidearum* Hering, 1954) листовых пластинок спиреи Вангутта (*Spiraea* × *vanhouttei* (Briot) Zabel), произрастающих в зеленых насаждениях Минска и Гомеля, установлено, что площадь единичных мин варьировала от 0,05 до 3,60 см^2 для Минска и от 0,08 до 4,63 см^2 для Гомеля при средних значениях (1,33 ± 0,92) и (1,51 ± 1,02) см^2 соответственно; наблюдаемые различия не были статистически достоверны. Высокие значения коэффициента вариации для обеих выборок (69,01 и 67,52% соответственно) могут свидетельствовать как о присутствии в выборках мин личинок разных возрастов, так и о наличии в них наряду с индивидуальными коллективных мин.

С использованием непараметрических критериев Манна – Уитни и Колмогорова – Смирнова выявлены статистически достоверные различия относительной площади поврежденной личинками *A. spiraeoidearum* листовой поверхности растений, произрастающих в зеленых насаждениях Минска и Гомеля, которые определяются статистически достоверными различиями площадей листовых пластинок спиреи Вангутта из Гомеля и Минска (P = 0,003 и P = 0,001 соответственно), а не различиями площадей отдельных мин (P = 0,0353 и P = 0,65 соответственно).

Список литературы

1. Чаховский А. А., Орленок Е. И. Таволги в декоративном садоводстве. Минск: Наука и техника, 1989. 72 с.

2. Businsky R., Businsky L. The genus *Spiraea* in cultivation in Bohemia, Moravia and Slovakia // Acta Pruhoniciana. 2002. No. 72. P. 1–165.

3. Spencer A. K. Host specialization in the world Agromyzidae (Diptera). Springer Publ., 1990. 444 p.

4. Гербарное дело: справочное руководство: русское издание / под ред. Д. В. Гельтмана. Кью: Королевский ботанический сад, 1995. 341 с.

5. Сауткин В. Ф. Использование программных средств анализа цифровых изображений для определения размерных характеристик биологических объектов: учеб.-метод. пособие. Минск: БГУ, 2013. 28 с.

References

1. Chakhovskiy A. A., Orlenok E. I. *Tavolgi v dekorativnom sadovodstve* [Spirea in decorative gardening]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1989. 72 p.

2. Businsky R., Businsky L.The genus *Spiraea* in cultivation in Bohemia, Moravia and Slovakia. *Acta Pruhoniciana*, 2002, no. 72, pp. 1–165.

3. Gel'tman D. V., editor. *Gerbarnoe delo: spravochnoe rukovodstvo: russkoe izdanie* [Herbarium: reference guide: Russian edition]. Kew, Korolevskiy botanicheskiy sad Publ., 1995. 341 p.

4. Spencer A. K. *Host specialization in the world Agromyzidae (Diptera)*. Springer Publ., 1990. 444 p.

5. Sautkin V. F. *Ispol'zovanie programmnykh sredstv analiza tsifrovykh izobrazheniy dlya opredeleniya razmernykh kharakteristik biologicheskikh ob"ektov: ucheb.-metod. posobie* [The use of digital image analysis software for determining the dimensional characteristics of biological objects: a teaching guide]. Minsk, BSU Publ., 2013. 28 p.

Информация об авторе

Волосач Марина Владимировна – аспирант, кафедра зоологии. Белорусский государственный университет (220030, г. Минск, пр. Независимости, 4, Республика Беларусь). E-mail: marinavolosach@yahoo.com

Information about the author

Volosach Marina Vladimirovna – PhD student, Department of Zoology. Belarusian State University (Nezavisimisty Ave., 4, 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: marinavolosach@yahoo.com

Поступила 20.05.2020

УДК 630.181

М. А. Иванова[1,2], Е. И. Федченко[2], С. М. Хамитова[2]
[1]Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова
[2]Вологодский государственный университет

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ПОЧВ И РАСПРОСТРАНЕННОСТИ ПОРОКОВ ДРЕВЕСИНЫ В НАСАЖДЕНИЯХ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Данное исследование посвящено оценке распространенности пороков древесины, обнаружению и количественному учету тяжелых металлов в почвах скверов города Вологды. При оценке распространенности пороков зеленых насаждений на территории 10 скверов города Вологды выявлено, что большая часть насаждений подвержена влиянию пороков разных видов. При этом среди самых часто встречаемых пороков древесных насаждений отмечены кривизна ствола, многоствольность и трещины. Данные пороки зафиксированы практически у всех пород деревьев и составляют в среднем от 30 до 90% от их общего количества. Такие пороки, как сбежистость, сучки, наросты и отслоение коры, у насаждений 10 исследованных скверов выявлены в меньшей степени. В ходе анализа определены скверы с наибольшей и наименьшей распространенностью пороков зеленых насаждений. В результате работы также получены сведения о распределении некоторых химических элементов в почвах скверов. Выявлены территории, наиболее и наименее загрязненные тяжелыми металлами. Проведено сравнение содержания тяжелых металлов с предельно допустимыми концентрациями (ПДК). В одном из скверов отмечено превышение ПДК свинца в почве.

Ключевые слова: тяжелые металлы, загрязнение почв, урбанизированная территория, зеленые насаждения, пороки древесины.

M. A. Ivanova[1,2], E. I. Fedchenko[2], S. M. Khamitova[2]
[1]North (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov
[2]Vologda State University

ASSESSMENT OF THE SOIL CONTAMINATION AND PREVALENCE OF WOOD DEFECTS IN PLANTINGS ON URBANIZED TERRITORIES

This study is devoted of assessment to the prevalence of wood defects, detection and quantitative accounting of heavy metals in the soils of squares in Vologda. When assessing the prevalence of defects of green spaces on the territory of 10 squares of the city of Vologda, it was found that most of the plantings are affected by various types of vices. Among tree plantations, such defects as trunk curvature, multi-barrel and cracks are most often found. These defects are recorded in almost all tree species and make up on average from 30 to 90% of their total number. Such defects as runaway, knots, growths and bark detachment in the studied plantings in 10 squares were found to a lesser extent. The analysis identified of squares with the highest and lowest the prevalence of green spaces defects. As a result, we also obtained information about the distribution of certain chemical elements in the soils of squares. The territories most and least polluted with heavy metals were identified. A comparison of the content of heavy metals with maximum permissible concentrations (MPC) was made. In one of the squares there was an excess of the MPC of lead (Pb) in the soil.

Key words: heavy metals, soil pollution, urban land, green planting, wood defects.

Введение. Одной из самых распространенных экологических проблем является качество санитарного состояния насаждений и уровень загрязненности почвы тяжелыми металлами. На сегодняшний день мировое увеличение выбросов приобретает стремительные темпы роста, и в случае, если не предпринять определенных мер, через несколько лет население столкнется с глобальным загрязнением атмосферы, почвенных ресурсов и ухудшением санитарного состояния зеленых насаждений [1–3].

Распространение заболеваний, причиной которых является повышенное содержание тяжелых металлов в почве, довольно значительно и оценивается в мировом масштабе в несколько миллионов человек. Поэтому изучение содержания тяжелых металлов в почве является важной прикладной задачей в области проблемы вредных выбросов. Актуальность подобного рода исследований обусловлена тем, что последствия, которые вызваны превышением тяжелых металлов в почве, могут затронуть и

общее санитарное состояние зеленых древесных насаждений [4–6]. В связи с этим важным стратегическим решением будет принятие мер по снижению концентрации тяжелых металлов там, где они превышают предельно допустимую концентрацию (ПДК). Кроме того, своевременное выявление зависимости между развитием заболеваний и наличием в почве определенного рода загрязнителей поможет избежать развития серьезных хронических осложнений и разработать профилактические меры по снижению риска заболеваемости. Улучшение показателей содержания по всем группам тяжелых металлов в короткие сроки не представляется возможным, поэтому целесообразно предпринять меры по снижению выбросов от источников, которые представляют наибольшую опасность для древесной растительности.

Комплексная оценка за состоянием урбанизированной среды состоит из оценок состояния множества компонентов, среди которых присутствует почвенный покров, а также древесные растения. При исследовании данных компонентов большое внимание уделяется почвенному химическому исследованию и экологическому состоянию древостоя.

Основная часть. Основу работы составляют материалы исследований города Вологды, государственные стандарты по определению подвижных и валовых форм тяжелых металлов, а также материалы отчетов по лабораторным испытаниям Центра агрохимической службы ФГБУ ГЦАС «Вологодский».

В качестве объектов исследования были взяты образцы почв на территории 10 скверов города Вологды. Чтобы определить загрязненность почв тяжелыми металлами, на выбранных объектах было отобрано методом «конверта» по 5 почвенных проб. Также на территории данных скверов была проведена оценка санитарного состояния зеленых древесных насаждений по показателю распространенности древесных пороков. Оценка производилась на основании классификации по ГОСТ 2140–81 [7]. При изучении доли насаждений, пораженных пороками, были исследованы все породы деревьев, растущие в границах 10 скверов города Вологды.

Проведение исследований, а именно обнаружение и количественный учет тяжелых металлов, токсичных веществ в городских почвах и оценка санитарного состояния зеленых насаждений является актуальным направлением современности, которое необходимо для поддержания санитарно-гигиенических характеристик, сохранения ценных растительных пород, моделирования и разработки природоохранных мероприятий.

Оценка степени химического загрязнения почв скверов города Вологды проводилась с помощью санитарно-гигиенического нормирования содержания тяжелых металлов (Cu, Zn, Pb, Cd, Ni, Co, Mn) в почвенно-растительном покрове путем соотнесения фактически определенной концентрации элементов с ПДК.

Химический анализ производился в Центре агрохимической службы ФГБУ ГЦАС «Вологодский». Количественный химический анализ почв был выполнен методом атомно-абсорбционного анализа.

Сравнение полученных показателей по почвам скверов были проведены на основании гигиенических нормативов ГН 2.1.7.2041–06 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве» [8].

Сравнительные данные содержания тяжелых металлов и показателя pH в почвах скверов города Вологды представлены в таблице.

В городе Вологде в основном преобладают дерново-подзолистый и суглинистый типы почвы с кислотностью более 5,5. В изучаемых скверах почвы слабокислые или нейтральные, кислотность варьируется от 6,6 до 7,0.

На всех изучаемых объектах концентрация меди в почвах не превышает ПДК (3,0 мг/кг). В районах, которые в будущем могут подвергнуться повышенному содержанию меди в почве – сквер на площади Революции, сквер на Соборной горке и сквер у СК «Юбилейный», концентрация меди на данный момент составляет 0,91, 0,89 и 0,88 мг/кг соответственно, однако в будущем превышение ПДК меди на этих территориях маловероятно. Наименьшая концентрация меди в почве обнаружена в сквере у дома Петра I – 0,61 мг/кг. Медь относится к веществам 3-го класса опасности. Значительное количество меди попадает в почву при применении медьсодержащих фунгицидов (бордорская смесь, хлорокись меди). Ухудшение доступности меди для растений заметно при повышении pH с 5,5 до 6,0. При высоком содержании в почвах меди и фосфора отмечаются признаки цинковой недостаточности. Избыток, как и недостаток, проявляется прежде всего на молодых листьях.

Концентрация цинка в почвах исследуемых территорий также не превышает ПДК (23 мг/кг). Самое высокое содержание цинка в почве отмечено в сквере у памятника С. В. Ильюшину – 18,4 мг/кг, в сквере на Соборной горке – 18,1 мг/кг, а самое низкое – в почвах сквера на площади Бабушкина – 9,3 мг/кг.

Предельно допустимая концентрация свинца в почве равна 6,0 мг/кг, а на территории сквера у памятника С. В. Ильюшину этот показатель равен 9,57 мг/кг, что превышает ПДК в 1,6 раза.

Содержание тяжелых металлов и pH в почвах скверов города Вологды

Наименование	Медь, мг/кг	Доля от ПДК	Цинк, мг/кг	Доля от ПДК	Свинец, мг/кг	Доля от ПДК	Кадмий, мг/кг	Доля от ПДК	Никель, мг/кг	Доля от ПДК	Кобальт, мг/кг	Доля от ПДК	Марганец, мг/кг	Доля от ПДК	pH
Сквер имени Кирова	0,85	0,28	17,3	0,75	4,35	0,73	0,026	0,01	0,47	0,12	0,23	0,05	10,2	0,10	6,6
Сквер на пл. Революции	0,91	0,30	10,9	0,47	4,95	0,83	0,033	0,02	0,78	0,20	0,42	0,08	21,4	0,21	6,9
Сквер на пл. Бабушкина	0,85	0,28	9,3	0,40	3,52	0,59	0,019	0,01	0,62	0,16	0,21	0,04	16,3	0,16	7,0
Сквер на Соборной горке	0,89	0,30	18,1	0,79	4,62	0,77	0,036	0,02	0,87	0,22	0,74	0,15	24,3	0,24	7,0
Сквер перед зданием Пединститута	0,62	0,21	12,4	0,54	3,54	0,59	0,031	0,02	0,73	0,18	0,46	0,09	19,9	0,20	6,9
Сквер у СК «Юбилейный»	0,88	0,29	13,9	0,60	4,56	0,76	0,029	0,02	0,79	0,20	0,32	0,06	21,8	0,22	6,9
Сквер у памятника Ильюшину	0,64	0,21	18,4	0,80	9,57	1,60	0,019	0,01	0,33	0,08	0,33	0,07	13,2	0,13	6,8
Сквер Театральный	0,65	0,22	14,0	0,61	5,22	0,87	0,025	0,01	0,53	0,13	0,32	0,06	15,0	0,15	6,8
Сквер у дома Петра 1	0,61	0,20	13,1	0,57	5,32	0,89	0,019	0,01	0,35	0,09	0,34	0,07	11,4	0,11	6,7
Сквер на Кремлевской площади	0,75	0,25	17,4	0,76	4,53	0,76	0,039	0,02	0,92	0,23	0,67	0,13	37,8	0,38	7,0
ПДК (ГЦ 2.1.7.2041-06)	3,0	–	23,0	–	6,0	–	2,0	–	4,0	–	5,0	–	100	–	–

На остальных исследуемых территориях содержание свинца находится в пределах нормы ПДК, однако в почвах сквера Театрального и сквера у дома Петра I его концентрация составляет 0,87–0,89 ПДК. Наименьшая концентрация свинца отмечается в почве сквера на площади Бабушкина – 3,52 мг/кг. На показатель содержание свинца в почвах значительное влияние оказывает автомобильный транспорт, особенно в местах крупных скоплений. Свинец, содержащийся в бензине, после сгорания топлива выбрасывается с выхлопными газами, загрязняя воздух, оседает на растительности и почве вдоль транспортных магистралей. При сгорании 1 л этилированного бензина в атмосферу выбрасывается 1 г свинца. Свинец также обладает способностью накапливаться в растениях, в которые он попадает из воздуха через почву. Причем в почвах транспортных магистралей свинец зачастую обнаруживается даже на больших глубинах.

Содержание кадмия в почвах исследуемых территорий не превышает нормы ПДК (2,0 мг/кг) и имеет незначительный разброс по уровню концентрации. Наибольшее содержание кадмия отмечается в сквере на Кремлевской площади (0,039 мг/кг) и в сквере на Соборной горке (0,036 мг/кг), наименьшие концентрации (0,019 мг/кг) – в сквере у дома Петра I, в сквере на площади Бабушкина, в сквере у памятника С. В. Ильюшину.

Содержание никеля в почвах не превышает ПДК (4,0 мг/кг). Среднее содержание данного тяжелого металла в почвах скверов города Вологды составляет 0,64 мг/кг. Наибольшее содержание никеля отмечается в сквере на Кремлевской площади (0,92 мг/кг) и в сквере на Соборной горке (0,87 мг/кг), наименьшее – в сквере у памятника С. В. Ильюшину (0,33 мг/кг) и в сквере у дома Петра I (0,35 мг/кг).

Содержание тяжелого металла кобальта не превышает предельно допустимую концентрацию (5,0 мг/кг) ни в одном выбранном для исследований объекте. Среднее содержание кобальта в почвах исследуемых территорий города составляет 0,40 мг/кг. Минимальное значение содержания этого тяжелого металла зафиксировано в почве на территории сквера на площади Бабушкина (0,21 мг/кг). Максимальное значение концентрации кобальта зафиксировано на территории сквера на Соборной горке (0,74 мг/кг).

Предельно допустимая концентрация марганца (100,0 мг/кг) в почвах исследуемых территорий также не превышена. Минимальное значение содержания марганца зафиксировано на территории сквера имени Кирова и составляет 10,2 мг/кг. Максимальное значение концентрации марганца установлено на территории сквера на Кремлевской площади – 37,8 мг/кг.

На территории 10 скверов города Вологды была проведена оценка состояния зеленых древесных насаждений. При проведении оценки были исследованы все породы деревьев на критерий распространенности древесных пороков. Основными породами на территории данных скверов являются вяз гладкий, тополь белый, береза повислая и липа мелколистная. Реже встречаются сирень амурская, рябина обыкновенная, ива ломкая, туя западная, ель обыкновенная, клен остролистный, дуб обыкновенный.

При оценке распространенности пороков зеленых насаждений на территории 10 скверов города Вологды выявлено, что около 70% насаждений подвержены влиянию пороков разных видов. Самыми часто встречаемыми пороками древесных насаждений были кривизна ствола, многоствольность и трещины. Данные пороки зафиксированы практически у всех пород деревьев и составляют от 30 до 90% от их общего количества. Реже встречаются такие пороки, как сбежистость, сучки, наросты и отслоение коры.

Территорий, на которых отсутствуют пороки древесных насаждений, не выявлено. Наибольшее количество пороков выявлено на таких территориях, как сквер у памятника С. В. Ильюшину и сквер Театральный. В данных скверах различным порокам подвержено более 60% зеленых насаждений. Наилучшее состояние зеленых насаждений можно отметить в скверах у дома Петра I, у СК «Юбилейный» и на площади Революции. В данных скверах порокам подвержено от 20 до 40% зеленых насаждений. Остальные исследуемые территории имеют в среднем 50% деревьев, у которых выявлены пороки.

Исходя из проведенной оценки распространенности пороков древесных насаждений, следует сделать следующее заключение. Многие зеленые насаждения на исследуемых территориях подвержены различным порокам и их сочетаниям и нуждаются в необходимости проведения комплексного ухода. Скверам, в которых насаждения находятся в хорошем состоянии, со временем будут требоваться мероприятия по уходу.

На территориях скверов с большим процентом насаждений, подверженных порокам, необходимо провести комплексные мероприятия (санитарные работы): вырубка деревьев, неудовлетворяющих показателям хорошего санитарного состояния насаждений, осуществление новых посадок древесных насаждений, проведение своевременного мониторинга в

целях предотвращения появления и распространения древесных пороков на данных территориях [9, 10].

Заключение. Таким образом, наиболее загрязненными тяжелыми металлами являются территории скверов на Соборной горке, у памятника С. В. Ильюшину и на Кремлевской площади, наименее загрязненными – скверы на площади Бабушкина и у дома Петра I.

К территориям с наибольшим распространением пороков древесных насаждений среди всех исследуемых можно отнести такие, как сквер у памятника С. В. Ильюшину и сквер Театральный. Зеленые насаждения на этих территориях нуждаются в необходимости проведения комплексного ухода. Наилучшее состояние зеленых насаждений можно отметить в скверах у дома Петра I, у СК «Юбилейный» и на площади Революции.

Прямой связи между распространенностью пороков древесины и степенью загрязненности почв тяжелыми металлами не выявлено. Однако в сквере у памятника С. В. Ильюшину обнаружено повышенное содержание тяжелых металлов в почве и наибольший процент распространенности пороков у зеленых насаждений, а в почвах сквера у дома Петра I – незначительное количество тяжелых металлов и наименьший процент деревьев, у которых выявлены пороки. Исходя из этого, можно предположить, что загрязнение почв тяжелыми металлами может влиять на распространенность пороков древесины.

Список литературы

1. Герасимова М. И. Антропогенные почвы. Смоленск: Ойкумена, 2003. 268 с.

2. Kovacs M. Biological indicators in environmental protection. New York: Ellis Horwood, 1992. 207 p.

3. Полубояринов О. И. Оценка качества древесного сырья. Ленинград: ЛТА, 1971. 69 с.

4. Agrios G. N. Plant pathology. Elsevier Acad. Press, 2004. 922 p.

5. Рувинова Л. Г., Сверчкова А. Н., Хамитова С. М., Авдеев Ю. М. Биологический мониторинг загрязнения почвенной и водной среды в условиях урбанизации // Вестник КрасГАУ. 2016. № 6 (117). С. 14–20.

6. Подлужная А. С., Бадмаева С. Э. Накопление тяжелых металлов в древесных растениях скверов и парков правобережья Красноярска // Вестник КрасГАУ. 2016. № 8 (119). С. 91–96.

7. Видимые пороки древесины. Классификация, термины и определения, способы измерения: ГОСТ 2140-81 [Электронный ресурс]. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200004894 (дата обращения: 01.03.2020).

8. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: ГН 2.1.7.2041-06 [Электронный ресурс]. URL: http://docs.cntd.ru/document/901966754 (дата обращения: 01.03.2020).

9. Mezquida E. T., Benkman C. W. Habitat area and structure affect the impact of seed predators and the potential for coevolutionary arms races // Ecology. 2010. No. 3 (91). P. 802–814.

10. Agrios G. N. Plant pathology. Elsevier Acad. Press, 2004. 922 p.

References

1. Gerasimova M. I. *Antropogennye pochvy* [Anthropic soils]. Smolensk, Oykumena Publ., 2003. 268 p.

2. Kovacs M. *Biological indicators in environmental protection*. New York, Ellis Horwood Publ., 1992. 207 p.

3. Poluboyarinov O. I. *Otsenka kachestva drevesnogo syr'ya* [Evaluation of the quality of wood raw materials]. Leningrad, LTA Publ., 1971. 69 p.

4. Agrios G. N. *Plant pathology*. Elsevier Acad. Press Publ., 2004. 922 p.

5. Ruvinova L. G., Sverchkova A. N., Hamitova S. M., Avdeev Yu. M. Biological monitoring of soil and aquatic pollution in urbanization. *Vestnik KrasGAU* [Messenger of KrasGAU], 2016, no. 6 (117). pp. 14–20 (In Russian).

6. Podluzhnaja A. S., Badmaeva S. Ye. Accumulation of heavy metals in woody plants of squares and parks on the right bank of Krasnoyarsk. *Vestnik KrasGAU* [Messenger of KrasGAU], 2016, no. 8 (119), pp. 91–96 (In Russian).

7. *GOST 2140-81. Vidimye poroki drevesiny. Klassifikatsiya, terminy i opredeleniya, sposoby izmereniya* [GOST 2140-81. Visible wood defects. Classification, terms and definitions, measurement methods]. Available at: http://docs.cntd.ru/document/1200004894 (accessed 01.03.2020).

8. *GN 2.1.7.2041-06. Predel'no dopustimye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshhestv v pochve* [GN 2.1.7.2041-06. Maximum allowable concentration (MPC) of chemicals in the soil]. Available at: http://docs.cntd.ru/document/901966754 (accessed 01.03.2020).

9. Mezquida E. T., Benkman C. W. Habitat area and structure affect the impact of seed predators and the potential for coevolutionary arms races. *Ecology*, 2010, no. 3 (91), pp. 802–814.

10. Agrios G. N. *Plant pathology*. Elsevier Acad. Press Publ., 2004. 922 p.

Информация об авторах

Иванова Марина Александровна – аспирант. Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова (163002, г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17, Российская Федерация). Преподаватель кафедры географии и рационального природопользования. Вологодский государственный университет (160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, Российская Федерация). E-mail: chokolmas@gmail.com

Федченко Елена Ивановна – преподаватель кафедры географии и рационального природопользования. Вологодский государственный университет (160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, Российская Федерация). E-mail: ellenn08@yandex.ru

Хамитова Светлана Михайловна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры географии и рационального природопользования. Вологодский государственный университет (160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, Российская Федерация). E-mail: xamitowa.sveta@yandex.ru

Information about the authors

Ivanova Marina Aleksandrovna – PhD student. North (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov (17, Severnaya Dvina Embankment, 163002, Arkhangelsk, Russian Federation). Lecturer, the Department of Geography and Rational Nature Management. Vologda State University (15, Lenina str., 160000, Vologda, Russian Federation). E-mail: chokolmas@gmail.com

Fedchenko Elena Ivanovna – lecturer, the Department of Geography and Rational Nature Management. Vologda State University (15, Lenina str., 160000, Vologda, Russian Federation). E-mail: ellenn08@yandex.ru

Khamitova Svetlana Mihailovna – PhD (Agriculture), Assistant Professor, the Department of Geography and Rational Nature Management. Vologda State University (15, Lenina str., 160000, Vologda, Russian Federation). E-mail: xamitowa.sveta@yandex.ru

Поступила 31.03.2020

УДК 630*41:595.768.24

В. Н. Кухта[1], А. А. Сазонов[1,2], Д. А. Бабуль[2]
[1]Белорусский государственный технологический университет
[2]РУП «Белгослес»

ПРИМЕНЕНИЕ ПОРУБОЧНЫХ ОСТАТКОВ В КАЧЕСТВЕ ЛОВЧЕГО МАТЕРИАЛА НА СОСНОВЫХ ВЫРУБКАХ

Исследования, проведенные в 2018–2019 гг. на вырубках после рубки сосновых древостоев, позволили выявить 19 видов стволовых вредителей, заселяющих порубочные остатки сосны. Из них наибольшее хозяйственное значение имеют *Ips acuminatus* Gyll. и *Monochamus galloprovincialis* Ol. Показаны большие потенциальные возможности по повышению эффективности сплошных санитарных рубок как средства регулирования численности вершинного короеда. Образующиеся при этом порубочные остатки служат хорошим ловчим материалом, способным защитить от заселения до 38 деревьев сосны на 1 га вырубки. При отсутствии очага стволовых вредителей утилизацию порубочных остатков сосны в условиях Беларуси целесообразно проводить только при проведении рубки древостоя в период апрель – июль. С середины июля до середины сентября необходим «мораторий» на утилизацию порубочных остатков с целью накопления там максимальной численности ксилофагов. После этого их утилизацию огневым или механическим способом необходимо осуществлять с середины сентября и до выпадения устойчивого снегового покрова. Предложена общая схема использования порубочных остатков на сплошных рубках в качестве ловчего материала.

Ключевые слова: стволовые вредители, порубочные остатки, видовой состав, ловчая древесина, санитарно-оздоровительные мероприятия.

V. N. Kukhta[1], A. A. Sazonov[1,2], D. A. Babul[2]
[1]Belarusian State Technological University
[2]RUE “Belgosles”

APPLICATION OF LOGGING RESIDUES AS TRAP MATERIAL ON PINE FELLING

Research conducted in 2018–2019 on the glade after the felling of pine stands allowed to identify 19 species of stem pests that populate felling pine remains. Of these, *Ips acuminatus* Gyll. and *Monochamus galloprovincialis* Ol. are of the greatest economic importance. Large potential opportunities to increase the efficiency of clear felling as a means of regulating the number of apical bark beetle are shown. The resulting logging residues serve as a good trap material that can protect up to 38 pine trees per 1 ha of felling from settlement. In the absence of a focus of stem pests, it is advisable to utilize pine logging residues in the conditions of Belarus only when cutting stands in the period April – July. From mid-July to mid-September, a “moratorium” on the disposal of logging residues is needed in order to accumulate the maximum number of xylophages there. After that, they must be disposed of by fire or mechanically from mid-September until a stable snow cover is formed. A general scheme for the use of cutting residues on clearcuts as a forage material is proposed.

Key words: stem pests, logging residues, species composition, trap wood, health-improving measures.

Введение. В настоящее время проблема усыхания сосновых насаждений под влиянием факторов, индуцированных глобальным изменением климата и хозяйственной деятельностью человека в лесу, приобрела в нашей стране массовый характер. Она является одной из крупнейших в области защиты лесов за всю историю ведения лесного хозяйства в Беларуси. Усыхание сосны сопровождается массовым размножением стволовых вредителей и в первую очередь вершинного короеда. На значительных территориях ксилофаги являются первопричиной усыхания древостоев. За 2016–2019 гг. санитарно-оздоровительными мероприятиями было вырублено 27,5 млн. м^3 древесины сосны. В отдельных регионах республики (Гомельская обл.) объем вырубаемой древесины хвойных пород в 2017–2018 гг. превышал их прирост, что фактически означает наступление вынужденного истощительного лесопользования по отдельным лесным формациям. Безусловно, такие масштабы патологических процессов заставляют искать пути совершенствования защитных мероприятий.

Применение ловчей древесины традиционно является одним из важных санитарно-оздо-

ровительных мероприятий, используемых в республике для регулирования численности короедов. Как защитное мероприятие оно было известно еще в XIX в. [1]. Использование ловчего материала, лежащего на земле, дает возможность выявления его заселенности на самых ранних стадиях, когда родительские особи ксилофагов еще не покинули питательный субстрат под корой. Этого нельзя сказать о растущих деревьях, заселенных, к примеру, вершинным короедом, поскольку в момент появления первых признаков изменения окраски хвои жуки, напавшие на них, уже покидают подкоровое пространство, оставив там свое потомство. Однако в литературе имеются неоднозначные высказывания различных авторов по поводу эффективности выкладки ловчих деревьев [2, 3].

Анализ литературных источников [2, 4–10] показывает, что в качестве ловчего материала, привлекающего ксилофагов, могут применяться:

– оставленные на корню, искусственно ослабленные деревья, чаще собранные в группы или ловчие участки;

– искусственно сваленные деревья, выложенные, как правило, группами или иными способами;

– целые хлысты или полученные из них сортименты;

– тонкомерные лесоматериалы и частично порубочные остатки.

При этом необходимо учитывать биологические и экологические особенности стволовых вредителей, географическое расположение насаждений, их лесорастительные условия, санитарное состояние, направление хозяйства, численность ксилофагов в лесу, возможности лесохозяйственных предприятий по своевременной утилизации ловчего материала. Все эти факторы, безусловно, сильно влияют на эффективность применения ловчей древесины для защиты сосновых насаждений от ксилофагов. Игнорирование даже одного из них может привести к нежелательным последствиям в виде либо создания «рассадника» для стволовых вредителей, либо полного отсутствия биологической эффективности этого мероприятия [4].

Целью данной работы являлось изучение возможности более полного и широкого использования порубочных остатков в качестве ловчего материала для ксилофагов на сосновых вырубках. Для достижения поставленной цели необходимым условием было решение следующих задач: выявление видового состава стволовых вредителей на порубочных остатках, установление популяционных показателей хозяйственно значимых видов и их численности, определение биологической эффективности и составление общей схемы использования порубочных остатков на сплошных рубках в качестве ловчего материала, а также определение оптимальных сроков его утилизации с учетом особенностей развития наиболее опасного вредителя сосновых лесов – вершинного короеда. Ранее применительно к сосновым насаждениям Беларуси этот вопрос детально не изучался, поэтому анализ литературных источников не позволяет прийти к определенным выводам.

В работе использованы данные, собранные в 2018–2019 гг. в Старобинском, Негорельском, Сморгонском опытном, Чериковском, Светлогорском и Лунинецком лесхозах. Нами были обследованы вырубки, образовавшиеся в разное время года. Порубочные остатки были сложены на лесосеках в кучи высотой 1,0–1,5 м и диаметром 1,5–4,0 м, или чаще всего собраны в валы высотой около 1,0–1,5 м и шириной порядка 2,0–4,5 м. На объектах проводилось выборочное вскрытие небольших участков коры топором на порубочных остатках по всей площади вырубки. Детальные учеты видового состава и численности вредных насекомых осуществлялись путем разбора куч или характерных участков валов порубочных остатков длиной 1–3 м, с разделением ветвей на заселенные и незаселенные ксилофагами. Заселенные ветви измерялись (длина и серединный диаметр), из них вырезались участки (палетки) для подсчета насекомых в камеральных условиях. На тонких ветвях учеты проводили по всей длине. Основными показателями, которые определяли по результатам учетов, являлись: для короедов – плотность поселения насекомых под корой, продукция, энергия размножения, короедный запас, короедный прирост; для усачей и смолевок – плотность заселения; для энтомофагов – средняя плотность поселения хищников и (или) паразитов [11, 12]. В заключение проводилось измерение длины валов на вырубке и перерасчет полученных показателей учета насекомых на 1 м погонный вала и 1 га вырубки.

Основная часть. В результате энтомологического анализа нами установлен видовой состав насекомых, которые наиболее часто развиваются на порубочных остатках в течение вегетационного периода (табл. 1). Как видим, данный перечень насчитывает 19 видов ксилофагов из 3 семейств отряда Жесткокрылые. Хозяйственное значение обнаруженных видов как при весеннем и раннелетнем, так и летне-осеннем заселении далеко не однозначно. Большинство из них встречается редко и не оказывает отрицательного влияния на состояние насаждений.

Таблица 1

Таксономический состав стволовых насекомых, развивающихся на порубочных остатках сосны обыкновенной в условиях Беларуси (2018–2019 гг.)

Семейство, вид	Время заселения		Экологическая группа	
	весеннее и раннелетнее	летне-осеннее	комлевые	вершинные
Curculionidae				
1. Вершинный короед (*Ips acuminatus* Gyll.)	+	+	–	+
2. Шестизубчатый короед (*I. sexdentatus* Boern.)	+	+	+	–
3. Короед-типограф (*I. typographus* L.)	+	+	+	–
4. Большой сосновый лубоед (*Tomicus piniperda* L.)	+	–	+	–
5. Малый сосновый лубоед (*T. minor* Hart.)	+	–	–	+
6. Сосновый короед-крошка (*Crypturgus cinereus* Hrbst.)	+	+	+	+
7. Четырехзубый гравер (*Pityogenes quadridens* Hartig.)	+	+	–	+
8. Двузубый гравер (*P. bidentatus* Herbst.)	+	+	–	+
9. Обыкновенный гравер (*P. chalcographus* L.)	+	+	–	+
10. Фиолетовый, или малый еловый лубоед (*Hylurgops palliatus* Gyll.)	+	–	+	+
11. Валежный короед (*Orthotomicus proximus* Eichh.)	+	+	+	+
12. Пушистый полиграф (*Polygraphus poligraphus* L.)	–	+	–	+
13. Полосатый, или хвойный, древесинник (*Trypodendron lineatum* Oliv.)	+	+	+	–
14. Смолёвка вершинная сосновая (*Pissodes piniphilus* Hrbst.)	–	+	–	+
Cerambycidae				
15. Черный сосновый усач (*Monochamus galloprovincialis* Ol.)	+	+	+	–
16. Вершинный сосновый усачик (*Pogonocherus fasciculatus* De Geer)	–	+	–	+
17. Серый длинноусый усач (*Acanthocinus aedilis* L.)	+	–	+	–
18. Рагий ребристый (*Rhagium inquisitor* L.)	+	+	+	–
Buprestidae				
19. Синяя сосновая златка (*Phaenops cyanea* F.)	+	+	+	–

Другие способны увеличивать численность и образовывать очаги массового размножения, вызывая гибель большого количества деревьев. Такие вредители, как шестизубчатый короед, большой сосновый лубоед, полосатый древесинник, серый длинноусый усач, рагий ребристый и синяя сосновая златка, практически всегда встречаются только на крупных порубочных остатках, например, оставленных на вырубках бревнах и колодах. В список физиологически активных [13] и хозяйственно значимых видов ксилофагов, которые доминируют на порубочных остатках (ветви и тонкомер) и способны при массовом размножении заселять ослабленные растущие деревья и формировать очаги, мы включили в первую очередь вершинного

короеда и черного соснового усача. *I. acuminatus* достаточно хорошо заселяет порубочные остатки на вырубках. Особенно охотно осваиваются незаселенные ветви на вырубках из-под сплошных санитарных рубок, чему во многом способствует наличие на участках источников агрегационного феромона этого вида. *M. galloprovincialis* заселяет сосновые ветви толщиной 5 см и более одинаково хорошо на всех вырубках.

Порубочные остатки на рубках главного пользования, где нет очагов вершинного короеда, в первую очередь заселяются валежным короедом и граверами *P. bidentatus* и *P. quadridens*. Эти же виды, как и смолёвка вершинная сосновая, создают конкуренцию вершинному короеду на участках, где проводились сплошные санитарные рубки. Малый сосновый лубоед является типичным представителем весеннего фенологического комплекса ксилофагов, заселяя ловчий материал весной одним из первых. Короед-типограф использует порубочные остатки сосны в основном для прохождения дополнительного питания в конце лета перед уходом на зимовку.

Исследования [14], проведенные нами на вырубках в Драчевском лесничестве Старобинского лесхоза в 2018 г., показали, что в осеннее время порубочные остатки являются благоприятным субстратом не только для размножения вершинного короеда, но и для зимовки взрослых жуков. Под корой встречались в большом количестве молодые светлые жуки, которые не мигрировали с вырубок, а прокладывали беспорядочные углубленные в древесину ходы дополнительного питания в местах отрождения, где и зимовали. Так же поступали и темные жуки родительского поколения, которые прокладывали ходы дополнительного питания после завершения откладки яиц. Большое количество жуков обоих поколений под корой свидетельствует, что не только родительские и молодые особи, соответственно заселившие и отродившиеся на порубочных остатках, остаются там зимовать. Имеет также место налет жуков вершинного короеда и внедрение их в порубочные остатки из сопредельных лесных массивов с целью дополнительного питания и зимовки в благоприятных условиях кормовых ходов. Последнее обстоятельство побудило нас выяснить вопрос о возможности использования порубочных остатков для отлова зимующего запаса жуков вершинного короеда.

В табл. 2 приведены результаты расчета биологической эффективности порубочных остатков, используемых в качестве ловчего материала на вырубке в Чериковском лесхозе, где рубка леса проводилась в июле 2019 г. (лесорубочный билет от 02.07.2019). Порубочные остатки на участке площадью 0,3 га были выложены в вал общей протяженностью 16,4 м, шириной 3,9 м, высотой 1,4 м.

Из табл. 2 следует, что фактическое количество родительских особей вершинного короеда, которые заселили порубочные остатки, составляет 67,5 тыс. экз. на 1 га вырубки. Это существенно выше (на 70%), чем их поселилось изначально (39,8 тыс. экз. на 1 га), т. е. кроме заселения с целью формирования потомства в июле, имел место налет жуков родительского поколения на порубочные остатки в августе с целью дополнительного питания. Порубочные остатки жуки активно используют для зимовки, и смогут покинуть их только в апреле следующего года при наступлении теплой погоды, стимулирующей выход имаго из состояния зимнего покоя. Вероятно, при благоприятной погоде дозаселение порубочных остатков может наблюдаться и несколько позже – в сентябре. В августе утилизация такого ловчего материала нецелесообразна. Порубочные остатки июльского образования следует утилизировать осенью, до выпадения устойчивого снегового покрова (ориентировочно – с 15 сентября до 15 ноября). Вместе с *I. acuminatus* на зимовку ушли свыше 3,5 тыс. экз. на 1 га личинок черного соснового усача и 8,5 тыс. экз. на 1 га сосновой вершинной смолёвки. Жуки типографа в основном покидали порубочные остатки сосны после прохождения на них дополнительного питания.

Проведенные ранее учеты на модельных деревьях показали, что для успешного заселения сосны в возрасте 50 лет необходимо порядка 3 тыс. особей вершинного короеда на одно дерево [15]. Применение рекомендуемой схемы утилизации ловчего материала (порубочных остатков) позволяет сохранить на следующий год от заселения родительским поколением не менее 22 деревьев сосны (в расчете на 1 га вырубки). С учетом того, что жуки несколько раз заселяют деревья, фактически эта цифра будет выше. Кроме того, уничтожение зимующего молодого поколения дополнительно позволяет сохранить от заселения еще 16 деревьев сосны.

Численность зимующих на вырубках ксилофагов может быть выше. Расчеты, проведенные в 2018 г., свидетельствуют, что на одной из вырубок в Старобинском лесхозе на 1 погонный метр вала порубочных остатков зимовали: жуков вершинного короеда – 1088 экз., личинок и куколок этого вида – 187 экз., личинок усачей – 22 экз. Всего осталось на зимовку на 1 га: жуков вершинного короеда – 435 тыс. особей, личинок и куколок – 75 тыс. особей, личинок черного соснового усача – около 9 тыс. особей [14].

Таблица 2

Биологическая эффективность ловчего материала

Видовой состав	Элементы учета	Уловистость ловчего материала, экз.			Количество сохраненных деревьев сосны (из расчета уничтоженных особей вершинного короеда), шт. на 1 га вырубки
		на 1 дм^2	на 1 п. м вала	на 1 га	
Вершинный короед	Теоретическое количество родительских особей (брачные камеры и маточные ходы)	2,64	727	39 769	13
	Фактическое количество живых родительских особей	2,79	766	41 900	14
	Сумма живых и погибших под корой родительских особей	4,49	1234	67 466	22
	Фактическое количество молодых особей	3,21	883	48 291	16
Черный сосновый усач	Личинки, уходы в древесину	0,24	65	3551	–
Смолёвка вершинная сосновая	Личинки, куколочные колыбельки	0,57	156	8522	–
Типограф	Жуки на дополнительном питании	0,33	91	4971	–

Наблюдения в 2018–2019 гг. на вырубках, проведенных в разное время года, позволили предложить общую схему использования порубочных остатков на сплошных рубках в качестве ловчего материала и сроки его утилизации (рис. 1). Следует различать два основных случая применения порубочных остатков в качестве ловчего материала – рубка насаждений, где очагов стволовых вредителей нет, и рубка в очагах ксилофагов.

При изначальном отсутствии в насаждении очагов вершинного короеда возможность заселения порубочных остатков сосны этим видом сохраняется в Беларуси только тогда, когда рубка древостоя проводилась в течение следующих месяцев – с апреля по июль. На вырубках, где валка деревьев проводится в другое время года, вершинный короед не поселяется на порубочных остатках. Следовательно, защитные мероприятия по предотвращению размножения этого вида на порубочных остатках нужно проводить только в случае, если древостой был вырублен в период с апреля по июль. Кроме того, отмечено, что при заселении порубочных остатков в июле у жуков вершинного короеда снижается миграционная активность, и они склонны оставаться в заселенном субстрате на зимовку. Так же поступают и молодые особи, отродившиеся в конце лета на этих порубочных остатках. Более того, наличие заселенного субстрата и естественного агрегационного феромона является мощным стимулирующим средством, которое привлекает на заселенные в июле порубочные остатки дополнительных жуков из сопредельных древостоев. Наблюдения и учеты показали наличие эффекта «дозаселения» в августе ранее уже заселенных вершинным короедом в июле порубочных остатков. Поэтому целесообразно оставлять порубочные остатки июльских вырубок до осени с целью накопления там максимального короедного запаса, и утилизировать их как ловчий материал уже осенью, после снижения пожарной опасности по условиям погоды.

В случае наличия в насаждении действующих очагов вершинного короеда в период с начала проявления первых признаков заселения деревьев перезимовавшими жуками (вторая половина мая) и до середины июля очаги необходимо оперативно разрабатывать, а заселенные порубочные остатки как можно скорее утилизировать. Разумный срок их утилизации не должен превышать 30 дней с момента рубки.

Однако со второй половины июля миграционная активность жуков снижается, и заселенные в это время порубочные остатки можно использовать как естественные источники феромона, перемешивая их в процессе лесозаготовки с незаселенными и используя этот комплексный субстрат для отлова вершинного короеда. На участках, где доля заселенных деревьев невелика (не более 20%), или рубка несколько запоздала и произошел разлет жуков, такой способ борьбы с вершинным короедом может оказаться более эффективным, чем сжигание порубочных остатков непосредственно после рубки. В этом случае начинать утилизацию порубочных остатков целесообразно со второй половины сентября, когда миграция жуков на зимовку заканчивается. Поскольку в осенне-зимний период миграции вершинного короеда не наблюдается, заселенные этим видом деревья и ловчий материал можно спокойно утилизировать до конца марта. Но целесообразно сделать это осенью, до установления устойчивого снегового покрова.

Лесопатологический мониторинг

Цель: контроль вершинного короеда в отведенных в рубку насаждениях

Тип ситуации

Очаги отсутствуют			Очаги присутствуют		
Схема действий			**Схема действий**		
Период	апрель – июнь	июль – август – март	**Период**	15 мая – 15 июля	16 июля – 15 сентября – 16 сентября – 31 марта
	Вырубка с оставлением порубочных остатков и их утилизация в случае заселения вершинным короедом через 30–60 дней после рубки	Вырубка с оставлением порубочных остатков на дозаселение зимующим запасом короедов и их утилизация в случае заселения вершинным короедом в период с 16 сентября		Вырубка с утилизацией порубочных остатков в течение 30 дней после начала рубки	Вырубка с оставлением порубочных остатков на дозаселение зимующим запасом и их утилизацией с 16 сентября – Вырубка с утилизацией порубочных остатков до 1 апреля

Общая схема использования порубочных остатков на сплошных рубках в качестве ловчего материала и сроки его утилизации

Таким образом, введение двухмесячного «моратория» на утилизацию порубочных остатков в период с середины июля до середины сентября позволит накапливать на них зимующий запас вершинного короеда. А их последующая утилизация в период с середины сентября и до установления устойчивого снегового покрова поможет уничтожить этот запас, предотвратив заселение деревьев по периметру вырубок на следующий год.

Результативная работа по регулированию численности вершинного короеда невозможна без совершенствования лесопатологического мониторинга за данным видом. В течение вегетационного периода необходимо регулировать сроки проведения лесозащитных мероприятий, поскольку они зависят от погодных условий года и скорости развития насекомых, а она, в свою очередь, может изменяться от года к году в диапазоне ±2–3 недели от среднего. Поэтому для точного установления фаз развития насекомых и оптимальных сроков проведения лесозащитных мероприятий необходимо не ограничиваться феромонным мониторингом, а дополнять его данными учетов развития популяций вершинного короеда на ловчем материале и на заселенных деревьях. Такой комплексный мониторинг проводится польскими специалистами по защите леса в сосняках, и они считают необходимым не ограничиваться феромонным надзором за вершинным короедом, а дополнять его данными учетов на ловчем материале и модельных деревьях [16].

При проведении в сосновых насаждениях санитарно-оздоровительных мероприятий (в первую очередь сплошных санитарных рубок) необходимо предварительно оценивать наличие вершинного короеда на отведенном в рубку участке путем валки 2–3 деревьев с признаками заселения ксилофагов (рыжая или матовая хвоя в кроне, буровая мука или выходные отверстия насекомых на стволе, веткопад и т. д.). После валки предположительно заселенных деревьев необходимо оценивать наличие вершинного короеда на них путем вскрытия небольших участков коры в области кроны на стволе и ветвях. Если короед имеется (родительские или молодые жуки, куколки, личинки), тогда к этому участку применяются правила для очагов ксилофагов (рисунок, тип ситуации – очаги присутствуют). Если, несмотря на внешние признаки (порыжение или другое изменение окраски хвои, веткопад, выходные отверстия и буровая мука и т. д.), особей вершинного короеда под корой в области кроны не наблюдается, к такому участку применяются правила, описанные для обычных насаждений (рисунок, тип ситуации – очаги отсутствуют). Для принятия правильного решения в каждом конкретном случае необходимо проверять наличие вершинного короеда на отведенном в рубку участке непосредственно перед началом разработки. Это позволит избежать впоследствии ненужной работы по утилизации порубочных остатков там, где вредители уже вылетели и под корой остаются зимовать полезные энтомофаги.

При проведении сплошных санитарных рубок в действующих очагах вершинного короеда, где подтверждено наличие особей вредителя под корой, можно применять дополнительные меры по уничтожению вредителей до и после начала рубки. В случае, если доля заселенных деревьев на участке относительно невелика (до 20%), возможно предварительное обезвреживание отведенного в рубку участка путем отбора и валки заселенных вершинным короедом деревьев, выявленных по внешним признакам, в порядке проведения подготовительных работ. После валки эти деревья очищаются от сучьев, порубочные остатки, заселенные вредителями, сжигаются (или мульчируются). После процедуры обезвреживания данный участок следует считать свободным от короедов, и к нему применяются те же правила разработки, что и к обычным древостоям. Таким образом, в порядке проведения подготовительных работ можно ликвидировать очаги вершинного короеда, а затем проводить лесосечные работы на участке механизированным способом, без последующей утилизации порубочных остатков.

Заключение. Видовой состав насекомых, заселяющих порубочные остатки сосны обыкновенной, которые были обследованы за период исследований, насчитывает 19 видов. Большинство из них не представляет угрозы жизнеспособным насаждениям. Наибольшее хозяйственное значение имеют 2 вида, которые способны образовывать очаги: вершинный короед и черный сосновый усач. Особенно хорошо осваиваются *I. acuminatus* незаселенные порубочные остатки на вырубках из-под сплошных санитарных рубок, во многом благодаря наличию на таких участках источников природного агрегационного феромона.

Проведенные исследования продемонстрировали большие потенциальные возможности по повышению эффективности сплошных санитарных рубок как средства регулирования численности вершинного короеда. Образующиеся при этом порубочные остатки служат хорошим ловчим материалом, привлекающим большое количество особей стволовых вредителей и способным защитить от заселения до 38 деревьев сосны на 1 га вырубки. Однако обязательным условием этого является мониторинг

заселенности деревьев вершинным короедом до проведения рубки и введение моратория на утилизацию порубочных остатков в период с середины июля до середины сентября.

При проведении сплошных рубок целесообразность и сроки утилизации порубочных остатков необходимо оценивать исходя из наличия очагов ксилофагов, времени проведения рубки и фенологии вредителей. Незаселенные порубочные остатки, которые образовались на вырубках, выполненных в сроки апрель – июль, можно успешно использовать в качестве ловчего материала при условии контроля их заселенности и своевременной утилизации. В этом случае возможно выявление заселенности на самых ранних стадиях, когда родительские особи вершинного короеда еще не покинули питательный субстрат под корой.

Список литературы

1. Skuhravý V. Lýkožrout smrkový (*Ips typographus* L.) a jeho calamity. Praha: Agrospoj, 2002. 196 p.

2. Харитонова Н. З. Лесная энтомология. Минск: Вышэйшая школа, 1994. 412 с.

3. Катаев О. А., Мозолевская Е. Г. Экология стволовых вредителей (очаги, их развитие, обоснование мер борьбы). Л.: Ленингр. лесотехн. акад., 1981. 88 с.

4. Воронцов А. И., Семенкова И. Г. Лесозащита. 4-е изд. М.: Лесная промышленность, 1988. 92 с.

5. Защита леса от вредителей и болезней: справочник / А. Д. Маслов [и др.]. М.: Агропромиздат, 1988. 414 с.

6. Нуортева М. Вредители лесов. М.: Лесная промышленность, 1985. 104 с.

7. Лесозащита / С. К. Флеров [и др.]. М.; Л.: Гос. лесотехн. изд-во, 1948. 480 с.

8. Храмцов Н. Н., Падий Н. Н. Стволовые вредители леса и борьба с ними. М.: Лесная промышленность, 1965. 158 с.

9. Маслов А. Д., Кутеев Ф. С., Прибылова М. В. Стволовые вредители леса. М.: Лесная промышленность, 1973. 144 с.

10. Лесная энтомология / М. Н. Римский-Корсаков [и др.]. 3-е изд. М.: Гослесбумиздат, 1949. 507 с.

11. Защита леса / В. Б. Звягинцев [и др.]. Минск: БГТУ, 2019. 164 с.

12. Катаев О. А., Поповичев Б. Г. Лесопатологические обследования для изучения стволовых насекомых в хвойных древостоях. СПб.: Изд-во СПбГЛТА, 2001. 72 с.

13. Мозолевская Е. Г. Оценка вредоносности стволовых вредителей // Сб. науч. тр. Моск. лесотехн. ин-та. М., 1974. Вып. 65: Вопросы защиты леса. С. 124–132.

14. Кухта В. Н., Блинцов А. И., Сазонов А. А. Особенности развития стволовых вредителей на сосновых вырубках // Итоги и перспективы развития энтомологии в Восточной Европе: сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 19–21 нояб. 2019 г. Минск: А. Н. Вараксин, 2019. С. 208–213.

15. Сазонов А. А., Кухта В. Н., Тапчевская В. А. Вспышка массового размножения вершинного короеда (*Ips acuminatus* (Gyllenhal, 1827) *Scolytina, Coleoptera*) в лесах Белорусского Полесья // Итоги и перспективы развития энтомологии в Восточной Европе: сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 6–8 сент. 2017 г. Минск: А. Н. Вараксин, 2017. 366–378.

16. Plewa R., Mokrzycki T. Występowanie, biologia i znaczenie gospodarcze kornika ostrozębnego *Ips acuminatus* (Gyllenhal, 1827) (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae) w Polsce // Sylwan. 2017. № 161 (8). S. 619−629.

References

1. Skuhravý V. *Lýkožrout smrkový (Ips typographus L.) a jeho calamity* [Spruce bark beetle (Ips typographus L.) and its calamities]. Praha, Agrospoj Publ., 2002. 196 p.

2. Kharitonova N. Z. *Lesnaya entomologiya* [Forest entomology]. Minsk, Vysheisaya shkola Publ., 1994. 412 p.

3. Kataev O. A., Mozolevskaya E. G. *Ekologiya stvolovykh vrediteley (ochagi, ikh razvitie, obosnovanie mer bor'by)* [Ecology of stem pests (foci, their development, justification of control measures)]. Leningrad, Leningradskaya lesotekhnicheskaya akademiya Publ., 1981. 88 p.

4. Vorontsov A. I., Semenkova I. G. *Lesozashchita* [Forest protection]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1988. 92 p.

5. Maslov A. D., Vedernikov N. M., Andreeva G. I., Zubov P. A., Krangauz R. A., Lyashenko L. I., Pavlinov N. P. *Zashchita lesa ot vrediteley i bolezney: spravochnik* [Protection of the forest from pests and diseases: reference]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1988. 414 p.

6. Nuorteva M. *Vrediteli lesov* [Pests of forests]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1985. 104 p.

7. Flerov S. K., Ponomareva E. N., Klyushnik P. I., Voronsov A. I. *Lesozashchita* [Forest protection]. Moscow, Leningrad, Gosudarstvennoe lesotekhnicheskoe izdatel'stvo Publ., 1948. 480 p.

8. Khramtsov N. N., Padyy N. N. *Stvolovye vrediteli lesa i bor'ba s nimi* [Stem forest pests and their control]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1965. 158 p.

9. Maslov A. D., Kuteyev F. S., Pribylova M. V. *Stvolovye vrediteli lesa* [Stem forest pests]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 144 p.

10. Rimsky-Korsakov M. N., Gusev V. I., Shiperovich V. Ya., Poluboyarinov I. I., Yatsentkovsky A. V. *Lesnaya entomologiya* [Forest entomology]. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1949. 507 p.

11. Zvyagintsev V. B., Blintsov A. I., Kozel A. V., Kukhta V. N., Sazonov A. A., Seredich M. O., Khvasko A. V. *Zashchita lesa* [Forest protection]. Minsk, BGTU Publ., 2019. 164 p.

12. Kataev O. A., Popovichev B. G. *Lesopatologicheskie obsledovaniya dlya izucheniya stvolovykh nasekomykh v khvoynykh drevostoyakh* [Forest pathological examinations for the study of stem insects in coniferous stands]. St. Petersburg, SPbGLTA Publ., 2001. 72 p.

13. Mozolevskaya E. G. Assessment of harmfulness of stem pests. *Sbornik nauchnykh trudov Moskovskogo lesotekhnicheskogo instituta* [Collection of scientific papers of the Moscow Forestry Institute], 1974, Issue 65: Forest protection issues, pp. 124–132 (In Russian).

14. Kukhta V. N., Blintsov A. I., Sazonov A. A Features of the development of stem pests in pine clearings. *Sbornik statey III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Itogi i perspektivy razvitiya entomologii v vostochnoy Evrope"* [Collection of articles of the III International scientific-practical conference "Results and prospects for the development of entomology in Eastern Europe"]. Minsk, A. N. Varaksin Publ., 2019, pp. 208–213 (In Russian).

15. Sazonov A. A., Kukhta V. N., Tapchevskaya V. A. Outbreak of mass reproduction of the apical bark beetle (Ips acuminatus (Gyllenhal, 1827) Scolytina, Coleoptera) in the forests of Belorussian Polesye. *Sbornik statey III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Itogi i perspektivy razvitiya entomologii v vostochnoy Evrope"* [Collection of articles of the II International scientific-practical conference "Results and prospects for the development of entomology in Eastern Europe"]. Minsk, A. N. Varaksin Publ., 2017, pp. 366–378 (In Russian).

16. Plewa R., Mokrzycki T. *Występowanie, biologia i znaczenie gospodarcze kornika ostrozębnego Ips acuminatus (Gyllenhal, 1827) (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae) w Polsce* [Occurrence, biology and economic significance of the pine bark beetle Ips acuminatus (Gyllenhal, 1827) (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae) in Poland]. Sylwan, 2017, no. 161 (8), pp. 619−629 (In Polish).

Информация об авторах

Кухта Валерий Николаевич – кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель кафедры лесозащиты и древесиноведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: v.kukhta80@gmail.com

Сазонов Александр Александрович – старший преподаватель кафедры лесозащиты и древесиноведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). Начальник лесоустроительной партии 1-й Минской лесоустроительной экспедиции. РУП «Белгослес» (220089, г. Минск, ул. Железнодорожная, 27, Республика Беларусь). E-mail: lesopatolog@rambler.ru

Бабуль Дмитрий Александрович – инженер-лесопатолог лесоустроительной партии 1-й Минской лесоустроительной экспедиции. РУП «Белгослес» (220089, г. Минск, ул. Железнодорожная, 27, Республика Беларусь). E-mail: babuld@bk.ru

Information about the authors

Kukhta Valery Nikolaevich – PhD (Agriculture), Senior Lecturer, the Department of Forest Protection and Wood Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.kukhta80@gmail.com

Sazonov Aleksandr Aleksandrovich – Senior Lecturer, the Department of Forest Protection and Wood Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). Head of I Minsk Forest Inventory Expedition. RUE "Belgosles" (27, Zheleznodorozhnaya str., 220089, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lesopatolog@rambler.ru

Babul Dmitry Alexandrovich – forest pathologist engineer, I Minsk Forest Inventory Expedition. RUE "Belgosles" (27, Zheleznodorozhnaya str., 220089, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: babuld@bk.ru

Поступила 31.03.2020

УДК 630*443.2*414

И. А. Машкин, Л. А. Корытько, В. П. Шуканов
Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси

ВЛИЯНИЕ ЗАЩИТНО-СТИМУЛИРУЮЩИХ ПРЕПАРАТОВ НА БОЛЕЗНЕУСТОЙЧИВОСТЬ И КАЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЯНЦЕВ ЕЛИ (*PICEA ABIES*) С ЗАКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ

В данной статье представлены результаты исследования влияния комплексных обработок посадочного материала ели обыкновенной (*Picea abies*) средствами защиты растений и микроудобрениями. С этой целью была произведена предпосевная инкрустация семян ели защитно-стимулирующими составами, включающими регуляторы роста Экосил Микс или Экосил Плюс, фунгицид Винцит Форте и пленкообразователь Гисинар-М с последующей посадкой семян в кассеты Plantek 35F. Параллельно в часть контейнеров на 30-е и 60-е сутки проращивания посредством полива вносились 0,02%-ные растворы регуляторов роста Экосил Микс или Экосил Плюс. Сеянцы выращивались в лабораторных условиях на протяжении 90 дней, по истечении которых подсчитано количество выросших, пораженных болезнями и погибших сеянцев. Для анализа влияния обработок на продуктивность растений измерена длина надземной части и корня, а также диаметр прикорневой шейки сеянцев, масса сырого и абсолютно сухого органического вещества. Болезнеустойчивость оценивалась путем определения уровня содержания пигментов фотосинтеза и продуктов перекисного окисления липидов.

Предпосевная обработка семян ели составленными защитно-стимулирующими смесями, а также параллельное внесение в почву регуляторов роста позволили добиться в большинстве вариантов положительного действия на продуктивность и болезнеустойчивость сеянцев ели с закрытой корневой системой. Наиболее сильный прирост под влиянием обработок отмечен для надземной части сеянцев, а в некоторых вариантах также наблюдался интенсивный рост корневой системы и увеличение органической массы. В свою очередь, анализ изменения физиолого-биохимических параметров показал, что часть произведенных обработок посевного материала ели средствами защиты растений позволили более эффективно реализовать адаптационно-защитный потенциал растений за счет активации обменных процессов, в частности стимулируя работу фотосинтетического аппарата и снижая окислительный стресс в клетках сеянцев.

Ключевые слова: семена, сеянцы, ель, средства защиты растений, микроудобрения, болезнеустойчивость, продуктивность, фотосинтез, окислительный стресс.

I. A. Mashkin, L. A. Korytsko, V. P. Shukanov
V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the NAS of Belarus

THE EFFECT OF PROTECTIVE-STIMULATING PRODUCTS ON PERSONAL INSTABILITY AND QUALITATIVE CHARACTERISTICS OF SPRUCE (*PICEA ABIES*) SEEDLINGS WITH CLOSED ROOT SYSTEM

This article presents the results of research of the effects integrated processing with plant protection products on spruce (*Picea abies*) seedlings with closed root system. Presowing seed treatment of spruce was carried out with compounds (through inlaid), including growth regulators Ecosil Mix or Ekosil Plus, fungicide Vincit Forte and film former Gisinar-M. The inlaid seeds were then planted in Plantek 35F containers. In some containers, the substrate was watered with 0.02% solutions of growth regulators Ecosil Mix or Ecosil Plus. On the 90th day of germination, the number and length of seedlings were measured. Then, the parameters of the root system and the mass of seedlings were additionally determined. The level of photosynthesis activity and oxidative processes in the cells of pine seedlings was also analyzed.

Treatment with plant protection products in most cases had a stimulating effect on disease resistance and seedling productivity. In most cases, a significant increase in the length and mass of seedlings was noted. Also, in some experience options, active growth was noted under the influence of treatments for the root system. It was also noted that treatments with plant protection products increase the amount of photosynthesis pigments and reduce oxidative stress in seedling cells, which favorably affects their disease resistance and productivity.

Key words: seeds, seedlings, spruce, plant protection products, microfertilizers, disease resistance, productivity, photosynthesis, oxidative stress.

Введение. В настоящее время площадь земель лесного фонда Республики Беларусь составляет 9582 тыс. га, или 46% площади, при этом покрытые лесом земли превышают 8260 тыс. га. Исходя из площади лесного фонда Беларуси, на одного жителя приходится около 0,9 га покрытых лесом земель и 189 м^3 древесного запаса. Несмотря на то, что это один из самых высоких показателей в Европе, интенсивное использование лесных ресурсов в деревоперерабатывающей, топливной и в других сферах хозяйствования поднимает вопрос усовершенствования лесовосстановления и лесоразведения [1]. В системе Министерства лесного хозяйства выстроена и успешно функционирует система лесовосстановления и лесоразведения. Так, в результате проведения целенаправленной работы в Республике Беларусь сохраняется формационная структура и породный состав лесов, повышается их устойчивость и продуктивность, увеличивается площадь покрытых лесом земель. При этом большое внимание уделяется восстановлению в первую очередь наиболее ценных хвойных и твердолиственных древесных пород [2].

Основным посадочным материалом для создания и восстановления лесных насаждений являются сеянцы, технология выращивания которых предусматривает выполнение системы агротехнических мероприятий, направленных на повышение их качества. Сеянцы нередко страдают от болезней, вызванных грибами, присутствующими на семенах. Поэтому подготовка семян к посеву является важным начальным этапом во всем длительном процессе выращивания сеянцев. Для предохранения семян и проростков от грибных болезней, вызывающих полегание сеянцев и другие болезни, применяется протравливание семян химическими средствами защиты, уничтожающими и подавляющими возбудителей грибных болезней. Также существует ряд препаратов, обладающих направленной росторегулирующей активностью, благодаря которой возможно опосредованное увеличение болезнеустойчивости посадочного материала на клеточном уровне [3]. Совместное применение фунгицидов и регуляторов роста в виде защитно-стимулирующих составов (ЗСС) при предпосевной обработке семян и дополнительное внесение в почву средств защиты растений должно продлевать и усиливать вызываемый ими эффект.

Не менее важным аспектом при выращивании сеянцев является выбор технологии посева. Наиболее перспективным направлением интенсификации процессов лесовыращивания выступает производство посадочного материала с закрытой корневой системой в условиях закрытого грунта путем выращивания контейнеризированных сеянцев. Данная технология позволяет автоматизировать производство, экономить семена, использовать более ранний посев и увеличить вегетационный период [4]. Однако несмотря на явные преимущества выращивания посадочного материала в контролируемых условиях, все еще имеется ряд недостатков, устранение которых возможно только при проведении всесторонних научных исследований, направленных на создание комплексных агротехнических приемов по увеличению роста и болезнеустойчивости семян и сеянцев.

Основная часть. Объектами исследования являлись сенцы ели обыкновенной (*Picea abies*) с закрытой корневой системой, выращенные в лабораторных условиях с использованием кассет Plantek 35F. Данные кассеты разделены на 35 ячеек, которые имеют вертикальные щели и направляющие ребра в стенках, что способствует наиболее естественному и правильному развитию корневой системы, а имеющиеся боковые щели предотвращают образование недостатка кислорода в почвенном комке ячейки и одновременно выполняют роль дренажа при чрезмерном поливе [5]. В качестве почвы для заполнения ячеек вносился специализированный грунт для выращивания хвойных пород растений. Семена высевались в ручную на глубину 1 см по две штуки в одну ячейку. Всего в каждом варианте для посева использовано 4 кассеты и 280 семян (70 штук в кассете) с трехкратной повторностью опыта.

Перед посевом часть семян были инкрустированы защитно-стимулирующими составами, включающими в себя фунгицид Винцит Форте, регуляторы роста Экосил Микс или Экосил Плюс, а также пленкообразователь Гисинар-М, в вариантах с дозировкой препаратов на 1 л воды при минимальном расходе рабочего раствора 10 мл/кг семян:

Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте 50 мл/л;

Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте 50 мл/л + + Гисинар-М 25 мл/л;

Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте 50 мл/л;

Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте 50 мл/л + + Гисинар-М 25 мл/л.

Винцит Форте, КС (флутриафол 37,5 г/л + + тиабендазол 25 г/л + имазалил 15 г/л) – системный фунгицид для защиты растений от комплекса заболеваний, передающихся с семенами, через почву и аэрогенным путем. Протравитель проявляет фунгицидный эффект в течение нескольких часов после высева протравленных семян. Действующие вещества обладают профилактическим и лечащим действием [6].

Экосил Микс, ВЭ (5 г/л тритерпеновых кислот) – природный полифункциональный препарат,

регулятор роста и индуктор иммунитета растений. Обогащен комплексом макро- и микроэлементов и широким спектром биологически активных соединений: модифицированных гуминовых кислот, фульвокислот, аминокислот и биогенных аминов (тирамин и др.), низкомолекулярных органических кислот (янтарная, малоновая, яблочная, щавелевая, и др.), фенолкарбоновых кислот [7].

Экосил Плюс, ВЭ (2,5 г/л тритерпеновых кислот) – регулятор роста, в состав которого помимо тритерпеновых кислот входит биологически активная сумма нейтральных изопреноидов, обогащенная композицией из более чем 30 легколетучих малополярных, моно- и сесквитерпеновых соединений [8].

Гисинар-М – пленкообразователь, представляющий собой полиэлектролитный гидрогель, получаемый на основе водорастворимого сополимера акриламида и натриевой соли акриловой кислоты. Препарат содержит микроэлементы в хелатной форме (Cu, Zn, Mg) и является микроудобрением, предназначенным для предпосевной обработки семян, а также для подкормок растений в период вегетации. Гисинар-М способствует более прочному закреплению защитно-стимулирующих составов на поверхности семян, что должно уменьшить необходимые дозировки других компонентов [9].

Параллельно в часть контейнеров на 30-е и 60-е сутки проращивания посредством полива вносились 0,02%-ные растворы регуляторов роста Экосил Микс или Экосил Плюс (расход рабочей жидкости – 5 л на 1 м^2) в вариантах:

Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте 50 мл/л + + полив Экосил Микс;

Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте 50 мл/л + + Гисинар-М 25 мл/л + полив Экосил Микс;

Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте 50 мл/л + + полив Экосил Плюс;

Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте 50 мл/л + + Гисинар-М 25 мл/л + полив Экосил Плюс.

Сеянцы выращивались на протяжении 90 дней, по окончании которых осуществлен учет количества проросших, пораженных болезнями и погибших сеянцев (табл. 1). Наибольший процент выросших сеянцев отмечен в вариантах без нанесения на семена пленкообразователя Гисинар-М. При этом полив почвы регуляторами роста с параллельным использованием при предпосевной обработке Гисинара-М вызывал снижение количества сеянцев относительно контроля. Вместе с тем произведенные обработки в большинстве вариантов позволили значительно снизить долю пораженных болезнями и погибших сеянцев. Все это указывает на их эффективность в повышении всхожести семян и болезнеустойчивости сеянцев ели.

Таблица 1

Влияние комплексных обработок на рост сеянцев ели обыкновенной

Варианты опыта	Взошедшие семена		Больные сеянцы		Погибшие сеянцы	
	%	% к конт.	%	% к конт.	%	% к конт.
Инкрустирование семян						
Контроль (сухие семена)	60,12	100	19,01	100	9,90	100
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л	76,43*	127	10,90*	57	4,21*	42
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л	60,48	101	12,40*	65	3,54*	36
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л	75,48*	126	10,88*	57	2,52*	25
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л	59,52	99	14,00*	74	5,20*	53
Инкрустирование семян и полив сеянцев 0,02%-ным раствором регуляторов роста (30 и 60 сут.)						
Контроль (сухие семена)	61,79	100	21,00	100	6,94	100
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + полив Экосил Микс	78,93*	128	4,68*	22	1,81*	26
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л + полив Экосил Микс	54,88*	89	18,87	90	7,81*	113
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + полив Экосил Плюс	71,55*	116	3,16*	15	2,00*	29
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л + полив Экосил Плюс	45,95*	74	33,94*	162	15,28*	220

* Данные статистически значимы по *t*-критерию Стьюдента (p = 0,05).

Также были измерены длина надземной части, корневой системы и толщина прикорневой шейки десяти случайно отобранных сеянцев в каждом варианте (табл. 2). Анализ полученных данных показал, что произведенные обработки оказывают влияние на биометрические параметры сеянцев. Так, в большинстве вариантов наблюдается существенное увеличение длины надземной части сеянцев и незначительное ее снижение относительно контроля. Однако достоверные изменения длины корневой системы и толщены прикорневой шейки в опытах без полива регуляторами роста отмечены только при инкрустации семян ЗСС в сочетаниях Экосила Микс и Экосила Плюс 0,1 мл/л с Винцитом Форте, КС 50 мл/л без Гисинара-М. В вариантах с параллельным внесением в почву росторегулирующих препаратов стимулирующее действие на интенсивность роста корневой системы также оказывалось при предпосевной обработке семян защитно-стимулирующими составами, не включающими Гисинар-М.

Для более точной оценки влияния обработок на ростовые процессы и продуктивность сеянцев была установлена масса сырого и абсолютно сухого органического вещества хвои, стеблей и корневой системы (табл. 3, 4). С этой целью в каждом варианте из 4 кассет три раза случайным образом отбиралось 10 сеянцев (при трехкратной повторности опыта исследовано 90 сеянцев), затем производилось взвешивание свежего материала (хвои, стеблей и корневой системы) на лабораторных весах. Массу абсолютно сухого органического вещества, используя этот же материал, определяли на основании ГОСТ 16483.7–71 [10] в стеклянных бюксах со снятыми крышками, помещенными в сушильный шкаф при температуре (103 ± 2)°С (минимальное время высушивания составляло 6 ч).

Инкрустирование семян ЗСС без последующего полива сеянцев регуляторами роста вызвало наиболее существенный прирост сырой и абсолютно сухой массы растений относительно контроля в сочетании Экосил Микс 0,1 мл/л + + Винцит Форте 50 мл/л. В остальных вариантах обработки без внесения в почву регуляторов роста зафиксированы значения, близкие к контрольным либо ниже. Дополнительный полив сеянцев рабочими растворами препаратов Экосил Микс и Экосил Плюс позволил усилить положительный эффект, оказываемый на накопление органического вещества в варианте Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте 50 мл/л + полив Экосил Микс с максимальным приростом сырой и абсолютно сухой массы стволиков (147 и 160% – соответственно), а также абсолютно сухой массы корней (до 176% к контролю). Помимо этого, существенное увеличение массы сырого и абсолютно сухого вещества сеянцев отмечено при сочетании в обработке Экосил Плюс 0,1 мл/л + + Винцит Форте 50 мл/л + полив Экосил Плюс.

Таблица 2

Влияние комплексных обработок на биометрические параметры сеянцев ели обыкновенной

Варианты опыта	Длина надземной части		Длина корня		Толщина прикорневой шейки	
	мм ($M \pm m$)	% к конт.	мм ($M \pm m$)	% к конт.	мм ($M \pm m$)	% к конт.
Инкрустирование семян						
Контроль (сухие семена)	40,87 ± 1,12	100	50,00 ± 2,24	100	0,75 ± 0,01	100
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л	48,93 ± 0,98*	120	56,17 ± 0,96*	112	0,84 ± 0,01*	113
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л	48,33 ± 1,52*	118	49,43 ± 0,67	99	0,76 ± 0,01	102
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л	46,90 ± 1,57*	115	53,33 ± 1,08	107	0,77 ± 0,02	103
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л	49,00 ± 1,16*	120	55,20 ± 2,03*	110	0,82 ± 0,01*	109
Инкрустирование семян и полив сеянцев 0,02%-ным раствором регуляторов роста (30 и 60 сут.)						
Контроль (сухие семена)	40,00 ± 1,29	100	48,10 ± 1,59	100	0,72 ± 0,01	100
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + полив Экосил Микс	53,60 ± 1,30*	134	58,20 ± 1,59*	121	0,88 ± 0,01*	122
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л + полив Экосил Микс	38,30 ± 0,89	96	40,97 ± 1,31*	85	0,66 ± 0,01*	92

Окончание табл. 2

Варианты опыта	Длина надземной части		Длина корня		Толщина прикорневой шейки	
	мм ($M \pm m$)	% к конт.	мм ($M \pm m$)	% к конт.	мм ($M \pm m$)	% к конт.
Инкрустирование семян и полив сеянцев 0,02%-ным раствором регуляторов роста (30 и 60 сут.)						
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + полив Экосил Плюс	54,07 ± 0,72*	135	59,03 ± 1,98*	123	0,85 ± 0,01*	118
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л + полив Экосил Плюс	40,30 ± 1,13	101	40,13 ± 1,32*	83	0,64 ± 0,01*	88

* Данные статистически значимы по *t*-критерию Стьюдента ($p = 0,05$).

Таблица 3

Влияние комплексных обработок на сырую массу сеянцев ели обыкновенной

Варианты опыта	Средняя масса сеянцев (10 штук)					
	Хвоя		Стволик		Корень	
	г ($M \pm m$)	% к конт.	г ($M \pm m$)	% к конт.	г ($M \pm m$)	% к конт.
Инкрустирование семян						
Контроль (сухие семена)	0,178 ± 0,002	100	0,146 ± 0,002	100	0,100 ± 0,001	100
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л	0,203 ± 0,002*	114	0,212 ± 0,001*	145	0,097 ± 0,001	97
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л	0,130 ± 0,002	73*	0,143 ± 0,001	98	0,066 ± 0,001*	66
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л	0,127 ± 0,001	71*	0,144 ± 0,001	98	0,072 ± 0,005*	71
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л	0,168 ± 0,001	94	0,135 ± 0,001	93	0,096 ± 0,001	95
Инкрустирование семян и полив сеянцев 0,02%-ным раствором регуляторов роста (30 и 60 сут.)						
Контроль (сухие семена)	0,179 ± 0,001	100	0,144 ± 0,001	100	0,103 ± 0,001	100
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + полив Экосил Микс	0,229 ± 0,001*	128	0,211 ± 0,001*	147	0,114 ± 0,001*	111
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л + полив Экосил Микс	0,126 ± 0,001*	70	0,136 ± 0,001	95	0,061 ± 0,001*	60
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + полив Экосил Плюс	0,230 ± 0,001*	129	0,205 ± 0,001*	143	0,117 ± 0,001*	113
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л + полив Экосил Плюс	0,155 ± 0,001*	87	0,132 ± 0,001*	92	0,070 ± 0,001	68

* Данные статистически значимы по *t*-критерию Стьюдента ($p = 0,05$).

Таблица 4

Влияние комплексных обработок на массу абсолютно сухого вещества сеянцев ели обыкновенной

Варианты опыта	Средняя масса сеянцев (10 штук)					
	Хвоя		Стволик		Корень	
	г ($M \pm m$)	% к конт.	г ($M \pm m$)	% к конт.	г ($M \pm m$)	% к конт.
Инкрустирование семян						
Контроль (сухие семена)	0,045 ± 0,001	100	0,039 ± 0,001	100	0,018 ± 0,001	100
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л	0,051 ± 0,001*	113	0,045 ± 0,001*	115	0,027 ± 0,001*	144

Окончание табл. 4

Варианты опыта	Средняя масса сеянцев (10 штук)					
	Хвоя		Стволик		Корень	
	г ($M \pm m$)	% к конт.	г ($M \pm m$)	% к конт.	г ($M \pm m$)	% к конт.
Инкрустирование семян						
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л	0,034 ± 0,001*	76	0,035 ± 0,001*	89	0,012 ± 0,001*	65
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л	0,039 ± 0,001*	86	0,042 ± 0,001*	109	0,015 ± 0,001*	82
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л	0,049 ± 0,001*	109	0,041 ± 0,001	105	0,020 ± 0,001*	111
Инкрустирование семян и полив сеянцев 0,02%-ным раствором регуляторов роста (30 и 60 сут.)						
Контроль (сухие семена)	0,045 ± 0,001	100	0,035 ± 0,001	100	0,015 ± 0,001	100
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + полив Экосил Микс	0,065 ± 0,001*	145	0,055 ± 0,001*	160	0,027 ± 0,001*	176
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л + полив Экосил Микс	0,034 ± 0,001*	75	0,027 ± 0,001*	79	0,014 ± 0,001	89
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + полив Экосил Плюс	0,069 ± 0,001*	152	0,058 ± 0,001*	169	0,025 ± 0,001*	164
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л + полив Экосил Плюс	0,046 ± 0,001	102	0,038 ± 0,001	109	0,013 ± 0,001*	86

* Данные статистически значимы по *t*-критерию Стьюдента ($p = 0,05$).

Учитывая то, что морфобиометрические параметры дают довольно субъективное представление о развитии болезней в растительном организме, так как инфекции, вызванные грибами, не всегда проявляются внешне, необходимо также исследовать формирование болезнеустойчивости по физиолого-биохимическим показателям. Напрямую развитие патогенных процессов отражают такие биохимические параметры, как уровень содержания продуктов перекисного окисления липидов и пигментов фотосинтеза, а также соотношение разных типов пигментов между собой [11].

Одну из важнейших ролей в протекании патологических реакций занимают активные формы кислорода (АФК), провоцирующие окислисление структурных элементов клетки. Постоянное образование активных форм кислорода является нормой, однако в ответ на стресс их количество резко возрастает, и так как естественные антиоксидантные системы уже не могут деактивировать избыток АФК, начинается интенсивное окисление органелл, зачастую приводящее к гибели клеток [12]. Одной из главных мишеней для АФК при их излишнем содержании является фотосинтетический аппарат. Под действием АФК нарушаются структура и функции хлоропластов, происходит инактивация работы фотосистемы II, снижается активность ферментов фотосинтеза, уменьшается концентрация хлорофиллов и каротиноидов. Повреждение фотосинтетического аппарата вызывает еще большее накопление АФК и, как следствие, окислительное повреждение мембран, цитоскелета, нарушение водного обмена клеток [13].

Исходя из вышесказанного, очевидно, что высокое содержание продуктов перекисного окисления липидов в растительном организме указывает на избыточное образование АФК и активное развитие болезней, в свою очередь, низкое значение данного показателя говорит об эффективной реализации адаптационно-защитного потенциала растения и нормальном протекании окислительных процессов в клетках [11–13].

Интенсивность перекисного окисления липидов мембран оценивали при помощи спектрофотометрического метода (с использованием спектрофотометра Proscan MC 122), основываясь на способности 2-тиобарбитуровой кислоты (ТБК) связываться с липидными перекисями (малоновый диальдегид). Образующиеся окрашенные ТБК-продукты являлись тестом

активности данного процесса. Пробу свежей массы, отобранную в трехкратной повторности, растирали до гомогената в 0,25% ТБК и 10% трихлоруксусной кислоты (ТХУ). Затем пробы нагревали 30 мин при 95°С, после чего охлаждали в проточной воде и доводили до метки дистиллированной водой, а затем центрифугировали на протяжении 15 мин при 8000g. Получившийся супернатант спектрофотометрировали при длине волн равной 532 нм. Количество ТБК-продуктов (мкМ/г свежей массы) рассчитывали, используя молярный коэффициент экстинкции – $1{,}55 \cdot 10^5$ $М^{-1} \cdot см^{-1}$ [14].

Произведенные комплексные обработки посадочного материала средствами защиты вызвали значительные колебания уровня содержания продуктов перекисного окисления липидов во всех опытах (табл. 5). При этом в вариантах без дополнительного внесения в почву росторегуляторов Экосил Микс и Экосил Плюс отмечено существенное снижение данного показателя относительно контроля (в диапазоне от 76 до 89%). В случае же полива сеянцев растворами регуляторов роста статистически значимое снижение содержания ТБК-продуктов зафиксировано только в опытах без использования при инкрустации семян пленкообразователя Гисинар-М. Включение в защитно-стимулирующие составы Гисинара-М, напротив, вызвало заметное увеличение интенсивности протекания перекисного окисления липидов мембран растительных клеток в сравнении со значениями, полученными в контрольном варианте.

Известно, что уровень содержание пигментов, участвующих в процессах фотосинтеза, подвержен мгновенным колебаниям при появлении инфекций вследствие не только окисления хлоропластов активными формами кислорода, но и общего нарушения процессов метаболизма в растении. С увеличением количества хлорофиллов и каротиноидов закономерно повышается интенсивность фотосинтеза, а в случае их снижения происходит обратное. При низкой эффективности фотосинтеза наблюдается резкое сокращение количества пластических веществ в тканях растения, что негативно отражается на способности растительного организма бороться с патогенами [11]. Помимо этого, следует учитывать то, что пестициды также способны угнетающе действовать на функционирование первичных метаболических путей растений, ввиду возможной фитотоксичности, устойчивость к которой определяется прежде всего видовыми особенностями, а также правильно подобранной дозировкой. Однако данные изменения зачастую обратимы, а в последствии, напротив, могут привести к интенсификации фотосинтеза, положительно влияя на рост и развитие сеянцев [14].

Таблица 5

Влияние комплексных обработок на окислительные процессы в клетках сеянцев ели обыкновенной

Варианты опыта	Содержание ТБК-продуктов	
	мкМ/г ($M \pm m$)	% к конт.
Инкрустирование семян		
Контроль (сухие семена)	10,07 ± 0,09	100
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л	8,99 ± 0,14	89
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л	8,06 ± 0,08	80
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л	8,97 ± 0,07	89
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л	7,66 ± 0,08	76
Инкрустирование семян и полив сеянцев 0,02%-ным раствором регуляторов роста (30 и 60 сут.)		
Контроль (сухие семена)	10,81 ± 0,13	100
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + полив Экосил Микс	8,07 ± 0,08*	75
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л + полив Экосил Микс	12,07 ± 0,10*	112
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + полив Экосил Плюс	8,05 ± 0,04*	74
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л + полив Экосил Плюс	12,30 ± 0,11*	114

* Данные статистически значимы по *t*-критерию Стьюдента ($p = 0{,}05$).

Таблица 6

Влияние комплексных обработок на содержание пигментов фотосинтеза в сеянцах ели обыкновенной

Варианты опыта	Хлорофилл *a*		Хлорофилл *b*		Каротиноиды	
	мг/г ($M \pm m$)	% к конт.	мг/г ($M \pm m$)	% к конт.	мг/г ($M \pm m$)	% к конт.
Инкрустирование семян						
Контроль (сухие семена)	0,64 ± 0,01	100	0,30 ± 0,01	100	0,43 ± 0,01	100
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л	0,65 ± 0,04	101	0,28 ± 0,01	93	0,30 ± 0,01*	69
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л	0,56 ± 0,01*	87	0,24 ± 0,01*	81	0,36 ± 0,01	83
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л	0,74 ± 0,01*	115	0,31 ± 0,01	103	0,43 ± 0,01	98
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л	0,53 ± 0,01*	82	0,23 ± 0,02	79	0,36 ± 0,01	82
Инкрустирование семян и полив сеянцев 0,02%-ным раствором регуляторов роста (30 и 60 сут.)						
Контроль (сухие семена)	0,64 ± 0,01	100	0,27 ± 0,01	100	0,44 ± 0,01	100
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + полив Экосил Микс	0,73 ± 0,01*	113	0,29 ± 0,01	106	0,46 ± 0,01	105
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л + полив Экосил Микс	0,56 ± 0,01*	87	0,27 ± 0,01	98	0,50 ± 0,03*	113
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + полив Экосил Плюс	0,70 ± 0,02*	108	0,32 ± 0,01*	119	0,52 ± 0,01*	117
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л + полив Экосил Плюс	0,56 ± 0,01*	87	0,26 ± 0,01	97	0,50 ± 0,02*	112

* Данные статистически значимы по *t*-критерию Стьюдента ($p = 0,05$).

Для исследования содержания фотосинтетических пигментов был выбран спектрофотометрический метод определения. Образцы хвои с постоянной навеской 0,2 г отбирали в трехкратной повторности. Далее в лабораторных условиях получали вытяжку пигментов в ацетоне. Экстракты пигментов фильтровались вакуумным способом, а после определяли оптическую плотность вытяжек на спектрофотометре Proscan MC 122. Количество отдельных пигментов устанавливали с помощью трехволнового метода, измеряя оптическую плотность (D) вытяжки при длине волн 662, 644 и 440 нм (максимумы поглощения соответственно хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротиноидов в ацетоне). Концентрацию хлорофиллов *a* и *b* и их сумму рассчитывали по уравнениям Винтерманс и Де Мотс для ацетона, а концентрацию каротиноидов в суммарной вытяжке пигментов вычисляли по уравнению Веттштейна [15, 16].

Выявленные изменения содержания пигментов фотосинтеза в хвое сеянцев под действием обработок (табл. 6) говорят о то, что произведенные агротехнические манипуляции оказывают как положительное, так и возможно отрицательное влияние на состояние фотосинтетического аппарата растений. В вариантах без полива регуляторами роста хвоя сеянцев ели к 90-м суткам проращивания имела наибольшее содержание пигментов фотосинтеза при инкрустации семян составом, включающим Экосил Плюс 0,1 мл/л и Винцит Форте 50 мл/л. В остальных опытах, не предполагающих параллельное внесение в почву росторегулирующих препаратов, уровень пигментов был ниже или равен контрольным показателям. Полив сеянцев регуляторами роста вызвал стимулирующий эффект в сочетаниях Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте 50 мл/л + полив Экосил Микс и Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте 50 мл/л + полив Экосил Плюс, при этом в первом варианте обработки несущественным оказался прирост в свежей массе сеянцев количества хлорофилла *b* и каротиноидов.

Помимо абсолютного содержания пигментов, в качестве критерия общей устойчивости у растений используют соотношение хлорофиллов *a* к *b* и хлорофиллов *a* и *b* к каротиноидам. Оно характеризует работу фотосинтетического аппарата и связано с активностью «главного» хлорофилла *a*, чем оно больше, тем интенсивнее должен протекать фотосинтез [17]. Необходимым спутником хлорофилла являются каротиноиды, которые хоть и не принимают непосредственного

участия в реакциях фотосинтеза, но исполняют роль собирательных антенн световой энергии и охраны чувствительной к свету молекулы хлорофилла. Их явное превалирование над хлорофиллами может указывать на чрезмерно высокую инсоляцию либо развитие инфекций в растительных клетках, обратное же соотношение зачастую говорит о снижении светособирающей функции пигментного комплекса, что также может свидетельствовать об ухудшении состояния растения. В норме для растений, у которых ассимиляция диоксида углерода в темновой фазе фотосинтеза происходит по типу C_3 (по циклу Кальвина), в зависимости от времени года соотношение хлорофилла *a* к *b* колеблется в диапазоне от 2 до 5, а хлорофиллов *a* и *b* к каротиноидам принимает значения от 2,2 до 8,0 [11, 15, 17].

Обработка посадочного материала ели средствами защиты растений вызвала определенные сдвиги в соотношении содержания пигментов фотосинтеза (табл. 7). Так, инкрустация семян защитно-стимулирующими составами без дополнительного внесения в почву регуляторов роста способствовала положительному смещению соотношения содержания пигментов фотосинтеза к контролю. При поливе сеянцев растворами регуляторов роста наиболее заметное смещение превалирования содержания хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* отмечено в варианте Экосил Микс 0,1 мл/л + + Винцит Форте 50 мл/л + полив Экосил Микс. В остальных вариантах обработки с дополнительным внесением регуляторов роста данный показатель остался примерно на уровне контроля, но на фоне этого явно увеличилось соотношение каротиноидов к хлорофиллам, что может свидетельствовать о наличии определенных стрессовых факторов (биотических и абиотических), к которым растения пытаются приспособиться путем наращивания доли вспомогательных пигментов фотосинтеза.

Заключение. Таким образом, произведенные комплексные обработки посадочного материала средствами защиты растений в большинстве вариантов оказывают положительное действие на продуктивность и болезнеустойчивость сеянцев ели обыкновенной с закрытой корневой системой. Практически все обработки позволили повысить всхожесть семян и уменьшить число пораженных болезнями сеянцев. Помимо этого, отмечен стимулирующий эффект препаратов на длину корней и надземной части сеянцев, а также интенсивность накопления органических веществ. На клеточном уровне положительное влияние обработок отражалось в увеличении количества пигментов фотосинтеза с сохранением их оптимального соотношения при одновременном снижении содержания продуктов перекисного окисления липидов в тканях сеянцев. Причем исходя из отмеченных закономерностей динамики изменения величины физиолого-биохимических показателей болезнеустойчивости наиболее оптимальными являются комплексные обработки посадочного материала ели, предполагающие инкрустирование семян ЗСС без использования пленкообразователя Гисинар-М и с дополнительным поливом сеянцев регуляторами роста Экосил Плюс или Экосил Микс.

Таблица 7

Влияние комплексных обработок на интенсивность фотосинтеза сеянцев ели обыкновенной

Варианты опыта	Хлорофилл *a* / *b*	Хлорофиллы / каротиноиды
Инкрустирование семян		
Контроль (сухие семена)	2,16	2,16
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л	2,26	3,06
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л	2,34	2,22
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л	2,40	2,45
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л	2,26	2,14
Инкрустирование семян и полив сеянцев 0,02%-ным раствором регуляторов роста (30 и 60 сут.)		
Контроль (сухие семена)	2,37	2,06
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + полив Экосил Микс	2,52	2,19
Экосил Микс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л + полив Экосил Микс	2,09	1,65
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + полив Экосил Плюс	2,16	1,97
Экосил Плюс 0,1 мл/л + Винцит Форте, КС 50 мл/л + Гисинар-М 25 мл/л + полив Экосил Плюс	2,12	1,66

Список литературы

1. «Большой разговор с Президентом» о лесе [Электронный ресурс] // Сайт Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь. URL: https://www.mlh.by/press-service/news/2695 (дата обращения: 12.11.2019).

2. Лесовосстановление [Электронный ресурс] // Сайт Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь. URL: https://www.mlh.by/our-main-activites/forestry/reforestation (дата обращения: 12.11.2019).

3. Ламан Н. А., Алексейчук Г. Н., Калацкая Ж. Н. Современная технология предпосевной обработки семян // Наука и инновации. 2006. № 9 (43). С. 37−41.

4. Граник А. М., Крук Н. К. Разработка новых приемов выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой // Труды БГТУ. 2015. № 1: Лесное хоз-во. С. 124−127.

5. Бабков А. В. Агротехнология выращивания посадочного материала хвойных пород с закрытой корневой системой // Лесное и охотничье хозяйство. 2013. № 10. С. 9−13.

6. Винцит Форте [Электронный ресурс] // FMC. URL: http://www.fmcrussia.com/Средства-защиты-растений/Препараты/Обработка-семян/Винцит-Форте (дата обращения: 15.11.2019).

7. Экосил Микс [Электронный ресурс] // АгроБелорус. URL: https://agrobelarus.by/market/polifunktsionalnye-prirodnye-preparaty/regulyator-rosta-rasteniy-ekosil-miks-ve-5g-l-triterpenovykh-kislot (дата обращения: 18.11.2019).

8. Экосил Плюс [Электронный ресурс] // АгроБелорус. URL: https://agrobelarus.by/market/polifunktsionalnye-prirodnye-preparaty/regulyator-rosta-rasteniy-ekosil-plyus-ve-2-5g-l (дата обращения: 18.11.2019).

9. Гисинар-М [Электронный ресурс] // Schauer Group. URL: http://schauer.by/katalog/gisinar/-gisinar-m# (дата обращения: 18.11.2019).

10. Древесина. Методы определения влажности (с изменениями № 1, 2, 3): ГОСТ 16483.7–71. Введ. 01.01.1973. М.: Стандартинформ, 2006. 3 с.

11. Волынец А. П., Шуканов В. П. Физиология патогенеза и болезнеустойчивости растений. Минск: Беларуская навука, 2016. 252 с.

12. Гарифзянов А. Р., Жуков Н. Н., Иванищев В. В. Образование и физиологические реакции активных форм кислорода в клетках растений // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 2. С. 100−120.

13. Колупаев Ю. Е. Активные формы кислорода в растениях при действии стрессоров: образование и возможные функции // Вестник Харьковского национального аграрного университета. Биология. 2007. № 3 (12). С. 6−26.

14. Иванов В. Б. Практикум по физиологии растений. М.: Академия, 2001. 136 с.

15. Храмченкова О. М. Практикум по физиологии растений: практическое руководство. Часть 1. Гомель: ГГУ, 2017. 44 с.

16. Коробко В. В., Касаткин М. Ю. Большой практикум по физиологии растений. Саратов: СГУ, 2017. 103 с.

17. Титова М. С. Содержание фотосинтетических пигментов в хвое *Picea abies* и *Picea koraiensis* // Вестник ОГУ. 2010. № 12. С. 9−12.

References

1. *Ministerstvo lesnogo khozyaystva Respubliki Belarus'. "Bol'shoy razgovor s Prezidentom" o lese* [Ministry of Forestry of the Republic of Belarus. "Big talk with the President" about the forest]. Available at: https://www.mlh.by/press-service/news/2695 (accessed 12.11.2019).

2. *Ministerstvo lesnogo khozyaystva Respubliki Belarus'. Lesovosstanovleniye* [Ministry of Forestry of the Republic of Belarus. Reforestation]. Available at: https://www.mlh.by/our-main-activites/forestry/reforestation (accesed 12.11.2019).

3. Laman N. A., Alekseychuk G. N., Kalatskaya J. N. Modern technology for pre-sowing seed treatment. *Nauka i innovatsii* [Science and innovation], 2006, no. 9 (43), pp. 37−41 (In Russian).

4. Granik A. M., Kruk N. K. Development of new methods for growing planting material with a closed root system. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 1: Forestry, pp. 124−127 (In Russian).

5. Babkov A. V. Agrotechnology of growing planting material of coniferous species with a closed root system. *Lesnoye i okhotnich'ye khozyaystvo* [Forestry and hunting], 2013, no. 10, pp. 9−13 (In Russian).

6. FMC. Vincit Forte. Available at: http://www.fmcrussia.com/Средства-защиты-растений/Препараты/Обработка-семян/Винцит-Форте (accessed 15.11.2019).

7. AgroBelarus. Ecosil Mix. Available at: https://agrobelarus.by/market/polifunktsionalnye-prirodnye-preparaty/regulyator-rosta-rasteniy-ekosil-miks-ve-5g-l-triterpenovykh-kislot (accessed 18.11.2019).

8. AgroBelarus. Ecosil Plus. Available at: https://agrobelarus.by/market/polifunktsionalnye-prirodnye-preparaty/regulyator-rosta-rasteniy-ekosil-plyus-ve-2-5g-l (accessed 18.11.2019).

9. Schauer Group. Gisinar-M. Available at: http://schauer.by/katalog/gisinar/gisinar-m# (accessed 18.11.2019).

10. GOST 16483.7-71. Wood. Moisture determination methods (as amended by No. 1, 2, 3). Moscow, Standartinform Publ., 2006. 3 p.

11. Volynets A. P., Shukanov V. P. *Fiziologiya patogeneza i bolezneustoychivosti rasteniy* [Pathogenesis physiology and disease resistance of plants]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2016. 252 p.

12. Garifzyanov A. R., Zhukov N. N., Ivanishchev V. V. Formation and physiological reactions of reactive oxygen species in plant cells. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2011, no. 2, pp. 100−120 (In Russian).

13. Kolupaev Yu. E. Active forms of oxygen in plants under the action of stressors: formation and possible functions. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Kharkov National Agrarian University], 2007, no. 3 (12): Biology, pp. 6−26 (In Russian).

14. Ivanov V. B. *Praktikum po fiziologii rasteniy* [Workshop on plant physiology]. Moscow, Akademiya Publ., 2001. 136 p.

15. Khramchenkova O. M. *Praktikum po fiziologii rasteniy: prakticheskoye rukovodstvo. Chast' 1* [Workshop on plant physiology: a practical guide. Part 1]. Gomel, GGU Publ., 2017. 44 p.

16. Korobko V. V., Kasatkin M. Yu. *Bol'shoy praktikum po fiziologii rasteniy* [Large workshop on plant physiology]. Saratov, SGU Publ., 2017. 103 p.

17. Titova M. S. Content of photosynthetic pigments in the needles of *Picea abies* and *Picea koraiensis*. *Vestnik OGU* [Bulletin of OSU], 2010, no. 12, pp. 9−12 (In Russian).

Информация об авторах

Машкин Иван Антонович − младший научный сотрудник лаборатории физиологии патогенеза и болезнеустойчивости растений. Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 27, Республика Беларусь). E-mail: patphysio@mail.ru

Корытько Лариса Александровна − научный сотрудник лаборатории физиологии патогенеза и болезнеустойчивости растений. Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 27, Республика Беларусь). E-mail: patphysio@mail.ru

Шуканов Владимир Петрович − кандидат биологических наук, заведующий лабораторией физиологии патогенеза и болезнеустойчивости растений. Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 27, Республика Беларусь). E-mail: patphysio@mail.ru

Information about the authors

Mashkin Ivan Antonovich − Junior Researcher of the Laboratory of Pathogenesis Physiology and Disease Resistance of Plants. Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: patphysio@mail.ru

Korytsko Larisa Aleksandrovna − Researcher of the Laboratory of Pathogenesis Physiology and Disease Resistance of Plants. Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: patphysio@mail.ru

Shukanov Vladimir Petrovich − PhD (Biology), Head of the Laboratory of Pathogenesis Physiology and Disease Resistance of Plants. Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: patphysio@mail.ru

Поступила 30.01.2020

УДК 632.4: 630*165.3

С. В. Пантелеев[1], О. Ю. Баранов[1], В. Б. Звягинцев[2], А. В. Ярук[2]
[1]Институт леса Национальной академии наук Беларуси
[2]Белорусский государственный технологический университет

ГЕНЕТИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ ИНВАЗИВНОГО АСКОМИЦЕТА *HYMENOSCYPHUS FRAXINEUS* BARAL ET AL. НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

С использованием генетических методов исследования (полимеразная цепная реакция, секвенирование по Сэнгеру) проведена верификация чистых культур возбудителя халарового некроза ветвей – аскомицета *Hymenoscyphus fraxineus* (T. Kowalski) Baral et al., изолированных с усыхающих растений ясеня обыкновенного и ясеня пенсильванского в лесных насаждениях пяти областей республики (Минская, Могилевская, Брестская, Витебская, Гродненская). Видовая идентификация основывалась на секвенировании нуклеотидной структуры региона рибосомной ДНК – 18S рРНК-ВТС1-5,8S рРНК-ВТС2-28S рРНК и ее последующем сравнении с депонентами международного банка генов Национального центра биотехнологической информации (NCBI, США).

На основании применения молекулярно-генетического метода RAPD изучена внутривидовая изменчивость 24 штаммов *H. fraxineus*. В ходе исследования были протестированы 18 RAPD-праймеров. Анализ информативности полученных ДНК-профилей позволил отобрать для изучения внутривидовой изменчивости *H. fraxineus* 5 праймеров: UBC-268, primer6, UBC-536, Oligo 85 и OPA-09. По результатам RAPD-анализа для исследованных штаммов составлены генетические паспорта по 29 специфическим ДНК-локусам.

Установлено, что в исследованной белорусской популяции *H. fraxineus* отмечается высокий уровень внутривидового разнообразия. Согласно данным RAPD-анализа уровень различий между штаммами в большинстве случаев варьировал в диапазоне 7–47% локусов (D_N = 0,0715–0,4769). Данное явление с учетом выявленного диффузного географического распределения генотипов можно объяснить гипотезой проникновения на территорию страны путем многократной инвазии спектра изолятов.

Ключевые слова: *Hymenoscyphus fraxineus*, штамм, ДНК, ДНК-локус, нуклеотидная структура, праймер, полимеразная цепная реакция, секвенирование, RAPD.

S. V. Panteleev[1], O. Yu. Baranov[1], V. B. Zviagintsev[2], A. V. Yaruk[2]
[1]Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus
[2]Belarusian State Technological University

GENETIC DIVERSITY OF INVASIVE ASCOMYCETE FUNGUS HYMENOSCYPHUS FRAXINEUS BARAL ET AL. IN THE TERRITORY OF BELARUS

In the forest stands of five regions of the republic (Minsk, Mogilev, Brest, Vitebsk, Grodno) using genetic methods of analysis (polymerase chain reaction, Sanger sequencing) the causative agent of ash dieback disease *Hymenoscyphus fraxineus* (T. Kowalski) Baral et al. were verified. The pathogen was isolated *in vitro* from drying plants of common ash and green ash. Species identification was based on amplification and sequencing of the nucleotide structure of the rDNA region 18S rRNA-ITS1-5.8S rRNA-ITS2-28S rRNA and its subsequent comparison with the depositors of the GenBank database of the National Center for Biotechnological Information (NCBI, United States).

Using the molecular genetic method RAPD the intraspecific variability of 24 *H. fraxineus* strains was studied. During the study 18 RAPD primers were tested. An analysis of the information content of the obtained DNA profiles made it possible to select 5 primers for studying the intraspecific variability of *H. fraxineus*: UBC-268, Oligo 31, UBC-536, Oligo 85, and OPA-09. For the strains genetic passports for 29 specific DNA loci were compiled.

It was established that the Belarusian population of *H. fraxineus* is characterized by a high level of intraspecific genetic diversity. According to RAPD analysis the level of differences between strains in most cases varied in the range of 7–47% of loci (D_N = 0,0715–0,4769). This phenomenon taking into account the geographical confinement of genotypes is explained by the hypothesis of the multiple invasion of the isolate spectrum into the country.

Key words: *Hymenoscyphus fraxineus*, strain, DNA, DNA locus, nucleotide structure, primer, polymerase chain reaction, sequencing, RAPD.

Введение. За последние два десятилетия в странах Европы стремительно распространилось инфекционное заболевание ясеня – халаровый некроз ветвей, или суховершинность (ash dieback disease, ADB) [1–6]. Это заболевание вызывается аскомицетным грибом *Hymenoscyphus fraxineus* (T. Kowalski) Baral et al., известным также как *Chalara fraxinea Kowalski* et al. и *H. pseudoalbidus Queloz* et al. Патоген был впервые диагностирован в Польше в 2006 г. [7]. В Европе это инвазивный и агрессивный вид, в сильной степени повреждающий ясенники и в основном ясень обыкновенный [4–8]. Родиной гриба считается Восточная Азия [9, 10], а его распространение на запад связывают с интродукцией инфицированного посадочного материала ясеня маньчжурского (*Fraxinus mandshurica* Rupr.) с Дальнего Востока России в период 1960–1980 гг. [11].

Ущерб, причиненный популяции ясеня в Европе халаровым некрозом ветвей, колоссален. Так, результаты лесопатологического мониторинга участков лесного фонда в Литве за 2008–2015 гг. показали гибель 61,1% ясеневых насаждений [12]. В Норвегии к 2016 г. доля усыхающих деревьев ясеня в лесных насаждениях с его преобладанием составила в среднем 57,2%, при этом в молодняках этот показатель достигал 80% [13]. В Латвии по данным официальной статистики на 2018 г. площадь ясенников сократилась по сравнению с 2005 г. на 40,6% [14]. В Великобритании в 2019 г. в насаждениях, созданных до наступления эпифитотии, максимально зарегистрированный показатель гибели деревьев составлял около 85%, в молодняках до 20 лет – 70% при естественном возобновлении – 82% [15]. Подобная ситуация наблюдается и в других европейских странах [16]. В Республике Беларусь на сегодняшний день площадь ясеневых насаждений также сократилась более чем на 40%. При этом к насаждениям с нарушенной биологической устойчивостью относят 98% ясенников [17]. Катастрофическая деградация ясеневых лесов требует разработки методов оперативного восстановления и сохранения природных популяций.

В настоящее время эффективных стратегий борьбы с данным заболеванием не разработано, и исследования в большинстве стран, которые пытались контролировать его распространение (проект FRAXBACK межправительственной программы COST), не увенчались успехом [18, 19].

Генетические исследования последних лет, основанные на методах секвенирования нового поколения, показывают, что европейская популяция *H. fraxineus* имеет происхождение лишь от нескольких изолятов из дальневосточной популяции России и возможно Японии [19]. Таким образом, полученные данные свидетельствуют об эффекте «бутылочного горлышка», в результате которого наблюдается меньшее генетического разнообразие в европейской популяции *H. fraxineus* по сравнению с дальневосточной. Однако данные по уровню генетического разнообразия популяций патогена приводятся в литературе в незначительных количествах [19]. Согласно литературным данным популяционно-генетические исследования *H. fraxineus* в странах Европы являются немногочисленными и выполнены с использованием различных типов ДНК-маркеров (SSR, ISSR). Вследствие этого сопоставление результатов представляется трудоемким, так как полученные данные являются разноплановыми, а выводы, сделанные авторами, частично противоречивыми. Так, в литературных источниках указывается как незначительный, так и высокий уровень генетического разнообразия в европейских популяциях *H. fraxineus* при высоком уровне генотипического полиморфизма [20–23].

Целью данной работы являлось изучение генетического разнообразия белорусской популяции *H. fraxineus* с использованием RAPD-анализа.

RAPD (англ. *random amplified polymorphic DNA*) – произвольно амплифицируемая полиморфная ДНК. ПЦР продукт RAPD образуется в результате амплификации фрагмента геномной ДНК, фланкированной инвертированной последовательностью десятимерного праймера [24]. По результатам ПЦР и электрофореза ампликонов получаются многофракционные видоспецифические спектры, напоминающие «штрих-код». Метод универсален для исследований разных видов организмов при использовании одних и тех же праймеров [25, 26]. Однако следует учесть, что разным видам может соответствовать свой оптимальный набор праймеров. Метод не позволяет делать выводы о филогении изучаемых индивидов, но является одним из наиболее доступных при изучении генетического полиморфизма в популяции.

Основная часть. Экспериментальный материал для получения культур *in vitro* аскомицета *H. fraxineus* (побеги с признаками некроза) был собран в лесных культурах ясеня, насаждениях с его преобладанием или примесью на территории пяти областей республики: Минская (ГЛХУ «Логойский лесхоз», ГОЛХУ «Борисовский опытный лесхоз», ГЛХУ «Минский лесхоз», ГОЛХУ «Стародорожский опытный лесхоз», ГЛХУ «Слуцкий лесхоз», Негорельский учебно-опытный лесхоз), Могилевская (ГОЛХУ «Осиповичский опытный лесхоз», ГЛХУ «Глусский лесхоз», ГЛХУ «Жорновская экспериментальная лесная база

Института леса НАН Беларуси», Брестская (Национальный парк «Беловежская пуща»), Витебская (ГЛХУ «Двинская экспериментальная лесная база Института леса НАН Беларуси», Гродненская (ГЛХУ «Лидский лесхоз»). Растения с признаками некроза ветвей были представлены различными возрастными группами (2–70 лет).

Объектом исследования являлись 24 чистые культуры гриба, морфологически диагностированные как *H. fraxineus* и введенные в культуру *in vitro* с использованием сусло-агаровой питательной среды из древесины побегов ясеня обыкновенного и ясеня пенсильванского с признаками инфекционного некроза ветвей.

Генетическая верификация вида проводилась методами полимеразной цепной реакции (ПЦР) и секвенирования по Сэнгеру.

Видовая идентификация основывалась на анализе нуклеотидной структуры ампликонов 18S рРНК-ВТС1-5,8S рРНК-ВТС2-28S рРНК региона рибосомной ДНК. ВТС (внутренние транскрибируемые спейсеры, англ. ITS) представляют собой видоспецифичные некодирующие участки, разделяющие гены рРНК транскрипционной единицы рДНК. Использование данного региона в качестве ДНК-маркера является «золотым стандартом» при проведении видовой идентификации грибов [27, 28].

Экстракция тотальной ДНК проводилась из фрагментов мицелия с использованием модифицированного CTAB-метода, описанного в литературных источниках [24]. Качество полученных препаратов суммарной ДНК оценивалось с использованием спектрофотометра NanoPhotometer P330 (Implen, Германия) согласно общепринятой методике [29].

Полимеразная цепная реакция осуществлялась на базе термоциклеров Gene Max (Bioer, КНР) с использованием ПЦР-смеси следующего состава: Taq Buffer (10X) with KCl, 25 mM MgCl2, 10 mM NTP, Taq DNA Polymerase (5 U/μL) (Thermo Fisher Scientific, США). Компоненты реакции добавлялись в концентрациях, рекомендуемых фирмой-производителем с использованием праймеров ITS1F CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA [28] и ITS4 TCCTCCGCTTATTGATATGC [27] в перерасчете на 25 мкл общего объема ПЦР-смеси.

Электрофоретическое фракционирование продуктов ПЦР проходило в 1,5%-ном агарозном геле с использованием 1×TBE буфера при комнатной температуре в течение 45 мин и параметрах тока 6 Вт. Последующее окрашивание осуществлялось в растворе бромистого этидия (0,5 мкг/мл) в течение 5 мин.

Очистка ПЦР-продуктов (ампликонов) перед постановкой секвенирующей реакции проводилась с применением набора Agencourt AMPure XP согласно инструкции (Beckman Coulter, США).

Секвенирующая реакция ставилась с использованием набора BigDye Terminator v1.1 Cycle Sequencing Kit (Thermo Fisher Scientific, США) и праймером ITS1F согласно протоколу производителя. Секвенирование ампликонов осуществлялось на базе генетического анализатора ABI Prism 3500 (Thermo Fisher Scientific). Анализ первичных данных проводился в программном обеспечении Sequencing Analysis 5.1.1 (Thermo Fisher Scientific, США). Видовая идентификация осуществлялась в международном генном банке Национального центра биотехнологической информации (NCBI, США) с использованием онлайн-сервиса Nucleotide BLAST [30].

С целью изучения генетического разнообразия идентифицированных штаммов *H. fraxineus* в ходе исследования были протестированы 18 десятимерных RAPD-праймеров (табл. 1).

Таблица 1

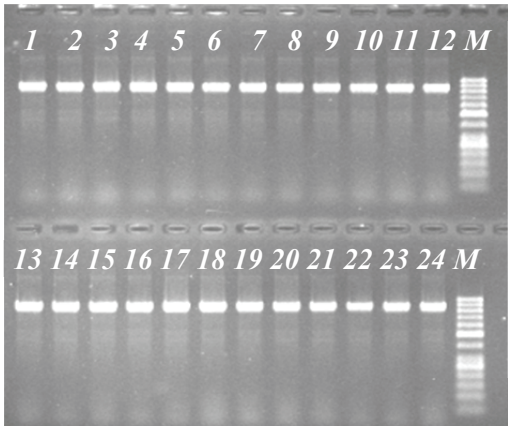
Перечень и основные характеристики RAPD-праймеров, использованных в ходе исследования

Нуклеотидная структура	Классификация	Температура отжига (T_a), °C
CGTCTGCCCG	UBC-106	43,0
TCCATGCCGT	UBC-154	38,5
CAAACGGCAC	UBC-184	34,5
CACGGCGAGT	UBC-203	38,7
CGCCCCCATT	UBC-254	43,0
AGGCCGCTTA	UBC-268	38,7
TCCCGAACCG	UBC-337	43,0
GCCCCTCGTC	UBC-536	41,0
CAATCGCCGT	OPA-11	38,7
GGTGCGGGAA	OPE-02	43,0
AAGAGCCCGT	primer 4	35,0
CCCGTCAGCA	primer 6	40,0
CCGCAGCCAA	OPA-08	45,2
ATCGGTCGGTA	Oligo 85	38,7
TCACCGAACG	Oligo 92	34,5
GGGTAACGCC	OPA-09	38,7
AATCGGGCTG	OPA-04	38,7
CAAACGTCGG	OPA-19	35,0

Интерпретация результатов RAPD-анализа и построение дендрограмм осуществлялось в программном обеспечении POPGEN v1.32 (University of Alberta, Канада) и MEGA6 (Institute of Molecular Evolutionary Genetics, США).

В ходе ПЦР-анализа с праймерами ITS1F и ITS4 был получен однофракционный электрофоретический спектр, что свидетельствовало о содержании генетического материала одного вида микромицетов в каждом отдельном образце. Дли-

на ампликонов насчитывала ≈900 п. н., что свойственно грибам из рода *Hymenoscyphus* (рис. 1).



1–24 – номера чистых культур грибов
M – маркер молекулярного веса (50–1000 п. н.)

Рис. 1. ПЦР-спектр исследуемых чистых культур грибов с использованием праймеров ITS1F/ITS4

Секвенирование продуктов ПЦР (ITS1F/ITS4) и сравнительный анализ полученных нуклеотидных последовательностей с депозитами базы данных Nucleotide NCBI [30] показали, что диагностируемые образцы принадлежат виду *Hymenoscyphus fraxineus* (T. Kowalski) Baral et al.

При этом генетическое сходство белорусских штаммов по маркерному региону рДНК со спектром депозитов NCBI отмечалось в диапазоне 99,08–100,00% с учетом показателя перекрытия нуклеотидных последовательностей (query coverage) 93–100% (табл. 2).

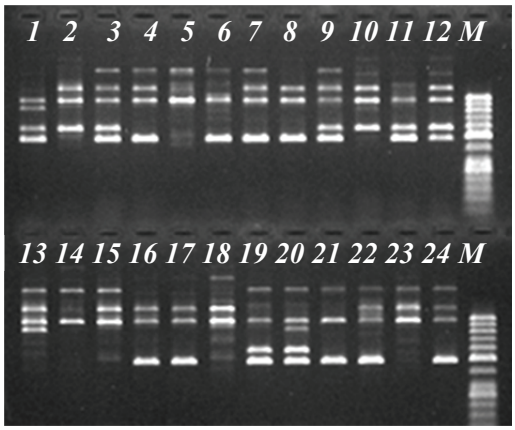
Таблица 2

Депозиты NCBI, используемые в исследовании

Штамм / Страна	Номер NCBI / % идент.
H. fraxineus ZT3404_1 / Австрия	MH931276.1 / 99,89–100
C. fraxinea AIN-M-8 / Франция	HM193468.1 / 99,89
H. fraxineus NK2 / Сербия	KX255648.1 / 99,89–100
C. fraxinea / Финляндия Kast1b, Knip4, Fag1	GU797161.1/ 99,88–100 GU797148.1 / 99,88–100 GU797152.1 / 99,88–100
H. fraxineus 23.1_DS / Хорватия	KY977559.1 / 99,54–99,66
H. fraxineus / Словакия H42, H146, CH_30	MF564277.1 / 99,54–99,65 MF175245.1 / 99,42–99,54 KU736880.1 / 99,08–99,20
H. pseudoalbidus 8097 / Китай	KF188725.1 / 99,65–99,77
H. fraxineus AIG17P / Швейцария	KJ820414.1 / 99,77–99,88

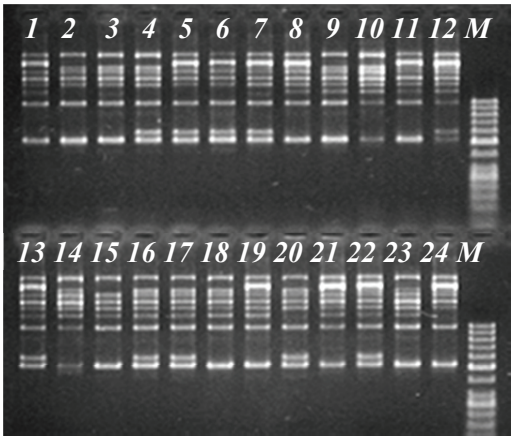
На основании полученных данных проведено депонирование белорусских генотипов *H. fraxineus* в базу международного генного банка NCBI с присвоением идентификационных номеров MK621286 и MT155386.

В ходе анализа информативности полученных RAPD-профилей для дальнейшего анализа генетического разнообразия штаммов *H. fraxineus* были отобраны 5 праймеров: UBC-268, primer 6, UBC-536, Oligo 85 и OPA-09 (рис. 2 и 3).



1–24 – номера штаммов H. fraxineus
M – маркер молекулярного веса

Рис. 2. RAPD-профиль штаммов *H. fraxineus* с праймером primer 6



1–24 – номера штаммов H. fraxineus
M – маркер молекулярного веса

Рис. 3. RAPD-профиль штаммов *H. fraxineus* с праймером UBC-536

Полиморфизм RAPD-маркеров представлен двумя группами аллелей. Первая группа характеризуется полной комплементарностью нуклеотидной структуры праймеров к местам их отжига в обоих фланкирующих регионах. На RAPD-профилях данная группа аллелей представлена четкой зоной амплификации и

обозначена как «1». Вторая группа характеризуется отсутствием комплементарности нуклеотидной структуры в местах отжига одного или обоих фланкирующих регионов, а также делецией амплифицируемого региона. На электрофореграммах данная группа аллелей представлена в виде отсутствия ПЦР-фракции в зоне амплификации и обозначена как «0» [25, 26].

Таким образом, в ходе анализа RAPD-профилей были составлены генетические паспорта исследуемых штаммов *H. fraxineus* по 29 локусам, которые были проанализированы в специальном программном обеспечении для популяционно-генетического анализа POPGEN v 1.32 и MEGA6. На основании расчета показателя генетической дистанции Неи (D_N) был установлен уровень генетической разнородности среди штаммов *H. fraxineus* в белорусской популяции.

Значения генетической дистанции Неи (D_N) среди изученных штаммов *H. fraxineus*, варьировали в значительной степени (D_N = 0,00–0,4769), что свидетельствовало о высоком показателе внутривидового генетического разнообразия. Так, в исследованной выборке, представленной 24 штаммами, генетическая идентичность по всем 29 локусам отмечалась только в случае двух штаммов из Лидского лесхоза (№ 16 и 17 на рис. 2 и 3). Остальные образцы характеризовались альтернативными вариантами генотипов в 7,1–47,7% локусов. Среднее значение показателя общего генетического разнообразия H_T = = 0,2046 при стандартном отклонении = 0,0440. На основании полученных значений генетической дистанции Неи с использованием невзвешенного парно-группового метода кластерного анализа (UPGMA) и метода максимального правдоподобия были построены дендрограммы, иллюстрирующие уровень генетической дифференциации исследованных штаммов *H. fraxineus* (рис. 4, 5).

Как видно из рис. 5, на полученной дендрограмме наблюдается запараллеливание более длинных ветвей. Данное явление получило название «гомоплазия», что свидетельствует о возникновении у выявленных штаммов вторичных гомологий, не унаследованных от общего предка и сближающих дивергированные организмы в ходе филогенеза (параллельная эволюция). В случае RAPD-локусов гомоплазии представлены сходными комбинациями аллелей.

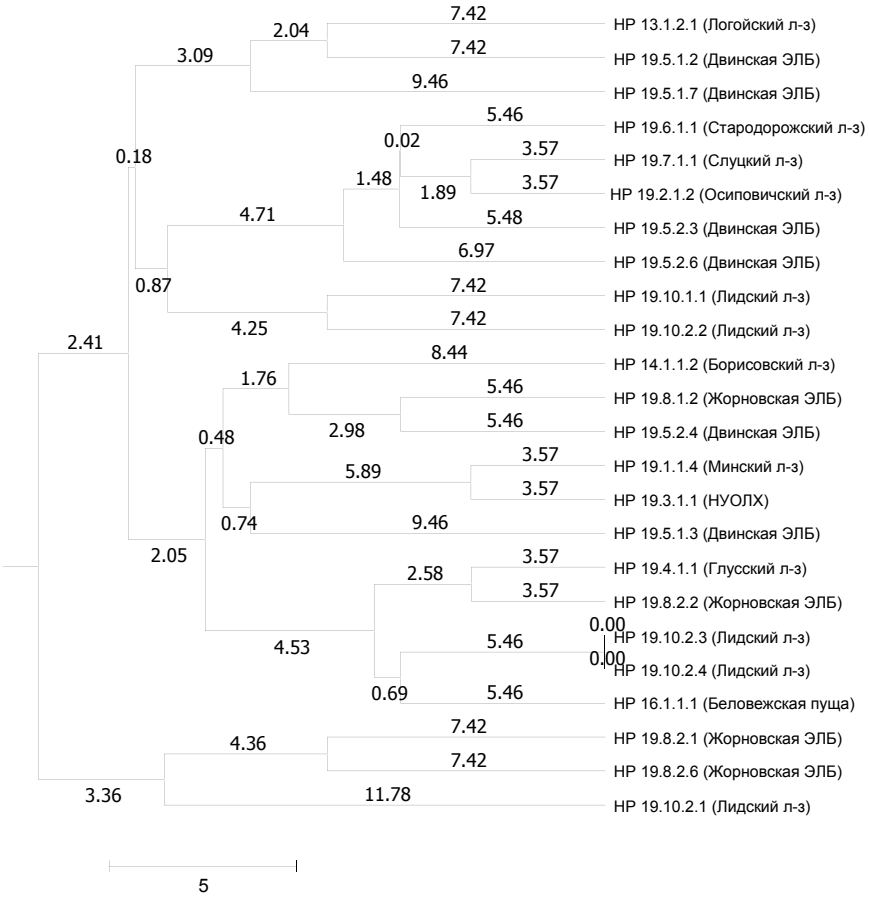


Рис. 4. Дендрогрограмма, иллюстрирующая уровень генетической дифференциации белорусских штаммов *H. fraxineus* (UPGMA, %)

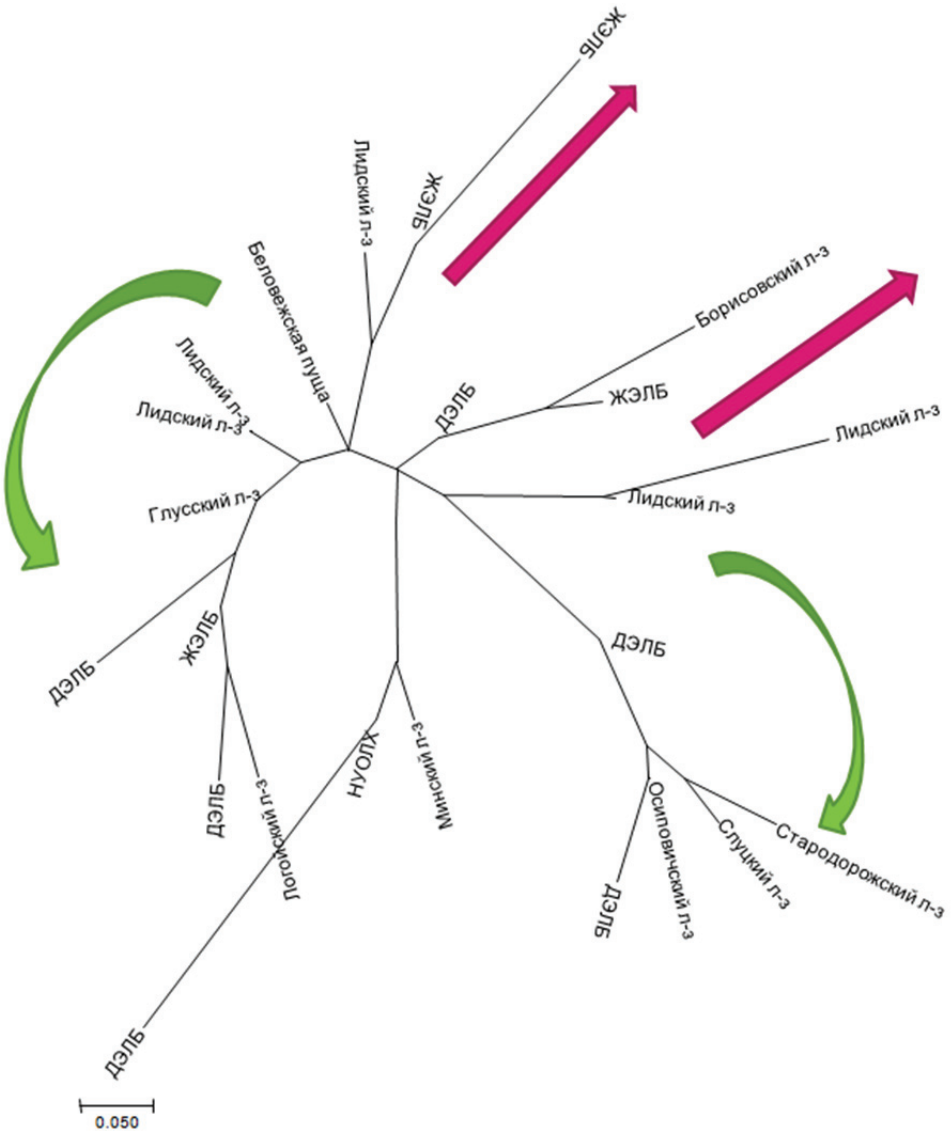


Рис. 5. Дендрограмма, иллюстрирующая уровень генетической дифференциации белорусских штаммов *H. fraxineus* (метод максимального правдоподобия)

Явление гомоплазии указывает на общую направленность развития популяции на определенной территории и может являться следствием адаптации к сходным условиям обитания под действием естественного отбора.

Заключение. Полученные данные указывают на то, что популяция *H. fraxineus* на территории Беларуси состоит из множества микропопуляций, генетическая структура которых не имеет строгой географической приуроченности.

Установленный высокий уровень генетического разнообразия у белорусских штаммов *H. fraxineus* и их диффузное географическое распределение по областям республики указывает на проникновение на территорию страны, по всей вероятности, путем многократной инвазии спектра изолятов. Многообразию генотипов возбудителя в популяции может способствовать также низкая конкуренция в силу сходной вирулентности штаммов и доступности кормовой базы. Полученные данные RAPD-анализа являются дополнением и вносят определенный вклад в популяционно-генетические исследования патогенного микромицета *H. fraxineus* на территории Европы.

Список литературы

1. Timmermann V., Borja I., Hietala A. M., Kirisits T., Solheim H. Ash dieback: pathogen spread and diurnal patterns of ascospore dispersal, with special emphasis on Norway // EPPO bull. 2011. Vol. 41. P. 14–20. DOI: 10.1111/j.1365-2338.2010.02429.x.

2. Bakys R., Vasaitis R., Barklund P., Thomsen I. M. Occurrence and pathogenicity of fungi in necrotic and non-symptomatic shoots of declining common ash (*Fraxinus excelsior*) in Sweden // European Journal of Forest Research. 2009. Vol. 128. P. 51–60. DOI: 10.1007/s10342-008-0238-2.

3. Pautasso M., Aas G., Queloz V., Holdenrieder O. European ash (*Fraxinus excelsior*) dieback – a conservation biology challenge // Biol. Conserv. 2013. Vol. 158. P. 37–49. DOI: 10.1016/j.biocon. 2012.08.026

4. Gross A., Holdenrieder O., Pautasso M., Queloz V., Sieber T. N. *Hymenoscyphus pseudoalbidus*, the causal agent of European ash dieback // Mol. Plant Pathol. 2014. Vol. 15. P. 5–21. DOI: 10.1111/mpp. 12073.

5. Zhao Y., Hosoya T., Baral H. O., Hosaka K., Kakishima M. *Hymenoscyphus pseudoalbidus*, the correct name for *Lambertella albida* reported from Japan // Mycotaxon. 2012. Vol. 122. P. 25–41. DOI: 10.5248/122.25.

6. McKinney L. V., Nielsen L. R., Collinge D. B., Thomsen I. M., Hansen J. K., Kjær E. D. The ash dieback crisis: genetic variation in resistance can prove a long-term solution // Plant Pathol. 2014. Vol. 63. P. 485–499. DOI: 10.1111/ppa.12196.

7. Kowalski T. *Chalara fraxinea* sp. nov. associated with dieback of ash (*Fraxinus excelsior*) in Poland // For. Pathol. 2006. Vol. 36. P. 264–270.

8. Fones H. N., Mardon C., Gurr S. J. A role for the asexual spores in infection of *Fraxinus excelsior* by the ash-dieback fungus *Hymenoscyphus fraxineus* // Sci. Rep. 2016. Vol. 6. P. 1–10. DOI: 10.1038/ srep34638.

9. Krautler K., Treitler R., Kirisits T. *Hymenoscyphus fraxineus* can directly infect intact current-year shoots of *Fraxinus excelsior* and artificially exposed leaf scars // For. Pathol. 2015. Vol. 45. P. 274–280. DOI: 10.1111/efp.12168.

10. Baral H. O., Queloz V., Hosoya T. *Hymenoscyphus fraxineus*, the correct scientific name for the fungus causing ash dieback in Europe // IMA Fungus. 2014. Vol. 5. P. 79–80. DOI: 10.5598/imafungus.2014.05.01.09.

11. Drenkhan R., Sander H., Hanso M. Introduction of Mandshurian ash (*Fraxinus mandshurica* Rupr.) to Estonia: Is it related to the current epidemic on European ash (*F. excelsior* L.) // European Journal of Forest Research. 2014. Vol. 133, no. 5. P. 769–781. DOI: 10.1007/s10342-014-0811-9.

12. Pliura A., Bakys R., Suchockas V., Marciulyniene D., Gustiene A., Verbyla V., Lygis V. Ash dieback in Lithuania: disease history, research on impact and genetic variation in disease resistance, tree breeding and options for forest management // Dieback of European ash (Fraxinus spp.) – Consequences and Guidelines for Sustainable Management. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, 2017. P. 150–166.

13. Timmermann V., Nagy N. E., Hietala A., Borja I., Solheim H. Progression of ash dieback in norway related to treeage, disease history and regional aspects // Balt. For. 2017. Vol. 23, no. 1. P. 150–158.

14. Matisone I., Matisons R., Laiviņš M., Gaitnieks T. Statistics of ash dieback in Latvia // Silva Fennica. 2018. Vol. 52, no. 1, P.1–6. DOI: 10.14214/sf.9901.

15. Coker T. L. R., Rozsypalek J., Edwards A., Harwood T. P., Butfoy L., Buggs R. J. A. Estimating mortality rates of European ash (Fraxinus excelsior) under the ash dieback (*Hymenoscyphus fraxineus*) epidemic // Plants People Planet. 2019. Vol. 1. P. 48–58.

16. Vasaitis R. Dieback of European Ash (*Fraxinus* spp.). Consequences and Guidelines for Sustainable Management // The Report on European Cooperation in Science & Technology (COST). Uppsala: SLU, 2017. 288 p.

17. Общая характеристика лесопатологической ситуации в лесном фонде Республики Беларусь. Ясеневые насаждения [Электронный ресурс] // Официальный сайт Учреждения «Беллесозащита». URL: http://www.bellesozaschita.by/front/ru/index?id=153. (дата обращения 05.01.2020).

18. Are Europe's ash trees finished? [Электронный ресурс] // NewScientist. URL: https://www. newscientist.com/article/dn22449-are-europes-ash-trees-finished. (дата обращения: 05.11.2019).

19. Sonstebo J. H., Vivian-Smith A., Adamson K., Drenkhan R., Solheim H., Hietala A. Genome-wide population diversity in *Hymenoscyphus fraxineus* points to an eastern Russian origin of European Ash dieback [Электронный ресурс] // The preprint server for biology. URL: https://www.biorxiv.org/content/10.1101/154492v1/ (дата обращения: 01.02.2020).

20. Rytkonen A., Lilja A., Drenkhan R., Gaitnieks T., Hantula J. First record of *Chalara fraxinea* in Finland and genetic variation among isolates sampled from Aland, mainland Finland, Estonia and Latvia // For. Path. 2011. Vol. 41. P. 169–174. DOI: 10.1111/j.1439-0329.2010.00647.x.

21. Kraj W., Zarek M., Kowalski T. Genetic variability of *Chalara fraxinea*, dieback cause of European ash (*Fraxinus excelsior* L.) // Mycol. Progress. 2012. Vol. 11. P. 37–45. DOI: 10.1007/s11557-010-0724-z.

22. Gross A., Grunig C. R., Queloz V., Holdenrieder O. A molecular toolkit for population genetic investigations of the ash dieback pathogen *Hymenoscyphus pseudoalbidus* // Forest Pathology. 2012. Vol. 42. P. 252–264. DOI: 10.1111/j.1439-0329.2011.00751.x.

23. Nguyen D. T., Cleary M. R., Enderle R., Berlin A., Stenlid J. Analyses of the ash dieback pathogen, *Hymenoscyphus fraxineus*, suggest role of tree species diversity on colonization and population structure differentiation // Forest Pathology. 2016. Vol. 48. P. 82–84. DOI: 10.1111/efp.12236.

24. Падутов В. Е., Баранов О. Ю., Воропаев Е. В. Методы молекулярно-генеического анализа // Минск: Юнипол, 2007. С. 51.

25. Which DNA marker for which purpose: final compendium of the research project // DGXII Biotechnology FW IV Research Programme; ed. E. M. Gillet / Institut fur Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung, Universität Göttingen. Göttingen, 1999. 253 p.

26. Ford-Lloyd B. Measuring genetic variation using molecular markers. Rome: IPGRI, 1996. 72 p.

27. White T. J., Bruns T. D., Lee S. B., Taylor J. W. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics // PCR protocols: a guide to methods and applications. 1990. P. 315–322. DOI: 10.1016/0168-9525(90)90186-A.

28. Gardes M., Bruns T. D. ITS primers with enhanced specifity for basidiomycetes application of the identification of mycorrhizae and rusts // Mol. Ecol. 1993. Vol. 2. P. 113–118. DOI: 10.1111/j.1365-294x.1993.tb00005.x.

29. Tataurov A. V., You Y., Owczarzy R. Predicting ultraviolet spectrum of single stranded and double stranded deoxyribonucleic acids // Biophys. Chem. 2008. Vol. 133. P. 66–70. DOI:10.1016/j.bpc.2007.12.004.

30. National Center for Biotechnological Information, NCBI [Электронный ресурс] // National Centre Biotechnology Information. URL: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/ (дата обращения: 10.09.2019).

References

1. Timmermann V., Borja I., Hietala A. M., Kirisits T., Solheim H. Ash dieback: pathogen spread and diurnal patterns of ascospore dispersal, with special emphasis on Norway. *EPPO bull*., 2011, vol. 41, pp. 14–20. DOI: 10.1111/j.1365-2338.2010.02429.x.

2. Bakys R., Vasaitis R., Barklund P., Thomsen I. M. Occurrence and pathogenicity of fungi in necrotic and non-symptomatic shoots of declining common ash (*Fraxinus excelsior*) in Sweden. *European Journal of Forest Research*, 2009, vol. 128, pp. 51–60. DOI: 10.1007/s10342-008-0238-2.

3. Pautasso M., Aas G., Queloz V., Holdenrieder O. European ash (*Fraxinus excelsior*) dieback – a conservation biology challenge. *Biol. Conserv*., 2013, vol. 158, pp. 37–49. DOI: 10.1016/j.biocon.2012.08.026

4. Gross A., Holdenrieder O., Pautasso M., Queloz V., Sieber T. N. *Hymenoscyphus pseudoalbidus*, the causal agent of European ash dieback. *Mol. Plant Pathol*., 2014, vol. 15, pp. 5–21. DOI: 10.1111/mpp.12073.

5. Zhao Y., Hosoya T., Baral H. O., Hosaka K., Kakishima M. *Hymenoscyphus pseudoalbidus*, the correct name for *Lambertella albida* reported from Japan. *Mycotaxon*, 2012, vol. 122, pp. 25–41. DOI: 10.5248/122.25.

6. McKinney L. V., Nielsen L. R., Collinge D. B., Thomsen I. M., Hansen J. K., Kjær E. D. The ash dieback crisis: genetic variation in resistance can prove a long-term solution. *Plant Pathol*., 2014, vol. 63, pp. 485–499. DOI: 10.1111/ppa.12196.

7. Kowalski T. *Chalara fraxinea* sp. nov. associated with dieback of ash (*Fraxinus excelsior*) in Poland. *For. Pathol*., 2006, vol. 36, pp. 264–270.

8. Fones H. N., Mardon C., Gurr S. J. A role for the asexual spores in infection of *Fraxinus excelsior* by the ash-dieback fungus *Hymenoscyphus fraxineus*. *Sci. Rep*., 2016, vol. 6, pp. 1–10. DOI: 10.1038/srep34638.

9. Krautler K., Treitler R., Kirisits T. *Hymenoscyphus fraxineus* can directly infect intact current-year shoots of *Fraxinus excelsior* and artificially exposed leaf scars. *For. Pathol*., 2015, vol. 45, pp. 274–280. DOI: 10.1111/efp.12168.

10. Baral H.O., Queloz V., Hosoya T. *Hymenoscyphus fraxineus*, the correct scientific name for the fungus causing ash dieback in Europe. *IMA Fungus*, 2014, vol. 5, pp. 79–80. DOI: 10.5598/imafungus.2014.05.01.09.

11. Drenkhan R., Sander H., Hanso M. Introduction of Mandshurian ash (*Fraxinus mandshurica* Rupr.) to Estonia: Is it related to the current epidemic on European ash (*F. excelsior* L.). *European Journal of Forest Research*, 2014. vol. 133, no. 5, pp. 769–781. DOI: 10.1007/s10342-014-0811-9.

12. Pliura A., Bakys R., Suchockas V., Marciulyniene D., Gustiene A., Verbyla V., Lygis V. Ash dieback in Lithuania: disease history, research on impact and genetic variation in disease resistance, tree breeding and options for forest management. In: Vasaitis R., Enderle R., editors. *Dieback of European ash (Fraxinus spp.) – Consequences and Guidelines for Sustainable Management*. Uppsala, Sweden, Swedish University of Agricultural Sciences Publ., 2017, pp. 150–166.

13. Timmermann V., Nagy N. E., Hietala A., Borja I., Solheim H. Progression of ash dieback in norway related to treeage, disease history and regional aspects. *Balt. For*., 2017, vol. 23, no. 1. pp. 150–158.

14. Matisone I., Matisons R., Laiviņš M., Gaitnieks T. Statistics of ash dieback in Latvia. *Silva Fennica*, 2018, vol. 52, no. 1, pp. 1–6. DOI: 10.14214/sf.9901.

15. Coker T. L. R., Rozsypalek J., Edwards A., Harwood T. P., Butfoy L., Buggs R. J. A. Estimating mortality rates of European ash (*Fraxinus excelsior*) under the ash dieback (*Hymenoscyphus fraxineus*) epidemic. *Plants People Planet*. 2019, vol. 1, pp. 48–58.

16. Vasaitis R. Dieback of European Ash (*Fraxinus* spp.). Consequences and Guidelines for Sustainable Management. *The Report on European Cooperation in Science & Technology (COST)*. Uppsala, SLU, 2017. 288 p.

17. *Obshchaya kharakteristika lesopatologicheskoy situatsii v lesnom fonde Respubliki Belarus'. Yasenevyye nasazhdeniya* [General characteristics of the forest pathological situation in the forest fund of the Republic of Belarus. Ash forests]. Available at: http://www.bellesozaschita.by/front/ru/index?id=153 (accessed 05.01.2020).

18. Are Europe's ash trees finished? Available at: https://www.newscientist.com/article/dn22449-are-europes-ash-trees-finished (accessed 05.11.2019).

19. Sonstebo J. H., Vivian-Smith A., Adamson K., Drenkhan R., Solheim H., Hietala A. Genome-wide population diversity in *Hymenoscyphus fraxineus* points to an eastern Russian origin of European Ash dieback. *BioRxiv*, 2017, pp. 1–25. DOI: 10.1101/154492. Available at: https://www.biorxiv.org/content/10.1101/154492v1/ (accessed 01.02. 2020).

20. Rytkonen A., Lilja A., Drenkhan R., Gaitnieks T., Hantula J. First record of *Chalara fraxinea* in Finland and genetic variation among isolates sampled from Aland, mainland Finland, Estonia and Latvia. *For. Path.*, 2011, vol. 41, pp. 169–174. DOI: 10.1111/j.1439-0329.2010.00647.x.

21. Kraj W., Zarek M., Kowalski T. Genetic variability of *Chalara fraxinea*, dieback cause of European ash (*Fraxinus excelsior* L.). *Mycol. Progress*, 2012, vol. 11, pp. 37–45. DOI: 10.1007/s11557-010-0724-z.

22. Gross A., Grunig C. R., Queloz V., Holdenrieder O. A molecular toolkit for population genetic investigations of the ash dieback pathogen *Hymenoscyphus pseudoalbidus*. *Forest Pathology*, 2012, vol. 42, pp. 252–264. DOI: 10.1111/j.1439-0329.2011.00751.x.

23. Nguyen D. T., Cleary M. R., Enderle R., Berlin A., Stenlid J. Analyses of the ash dieback pathogen, *Hymenoscyphus fraxineus*, suggest role of tree species diversity on colonization and population structure differentiation. *Forest Pathology*, 2016, vol. 48, pp. 82–84. DOI: 10.1111/efp.12236.

24. Padutov V. Ye., Baranov O. Yu., Voropayev Ye. V. *Metody molekulyarno-geneticheskogo analiza* [Molecular genetic analysis methods]. Minsk, Yunipol Publ., 2007. 176 p.

25. Which DNA marker for which purpose: final compendium of the research project. *DGXII Biotechnology FW IV Research Programme; ed. E. M. Gillet.* Institut fur Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung, Universität Göttingen, 1999, 253 p.

26. Ford-Lloyd B. *Measuring genetic variation using molecular markers*. Rome, IPGRI Publ., 1996, 72 p.

27. White T. J., Bruns T. D., Lee S. B., Taylor J. W. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. *PCR protocols: a guide to methods and applications*, 1990, pp. 315–322. DOI: 10.1016/0168-9525(90)90186-A.

28. Gardes M., Bruns T. D. ITS primers with enhanced specifity for basidiomycetes application of the identification of mycorrhizae and rusts. *Mol. Ecol*., 1993, vol. 2, pp. 113–118. DOI: 10.1111/j.1365-294x.1993.tb00005.x.

29. Tataurov A.V., You Y., Owczarzy R. Predicting ultraviolet spectrum of single stranded and double stranded deoxyribonucleic acids. *Biophys. Chem*., 2008, vol. 133, pp. 66–70. DOI: 10.1016/j.bpc.2007.12.004.

30. National Center for Biotechnological Information, NCBI. Available at: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/ (accessed 10.09.2019).

Информация об авторах

Пантелеев Станислав Викторович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник. Институт леса Национальной академии наук Беларуси (246050, г. Гомель, ул. Пролетарская, 71, Республика Беларусь). E-mail: stasikdesu@mail.ru

Баранов Олег Юрьевич – доктор биологических наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт леса Национальной академии наук Беларуси (246050, г. Гомель, ул. Пролетарская, 71, Республика Беларусь). E-mail: betula-belarus@mail.ru

Звягинцев Вячеслав Борисович − кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой лесозащиты и древесиноведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: mycolog@ tut.by

Ярук Анна Владимировна – ассистент кафедры лесозащиты и древесиноведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: smile_04@mail.ru

Information about the authors

Panteleev Stanislav Victorovich – PhD (Biology), Senior Researcher. Institute of Forest of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: stasikdesu@mail.ru

Baranov Oleg Yur'evich – DSc (Biology), Associate Professor, Head of the Laboratory. Institute of Forest of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: betula-belarus@mail.ru

Zviagintsev Viacheslav Borisovich − PhD (Biology), Associate Professor, Head of Department of Forest Protection and Wood Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mycolog@tut.by

Yaruk Anna Vladimirovna – Assistant Lecturer, Department of Forest Protection and Wood Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: smile_04@mail.ru

Поступила 20.03.2020

ТУРИЗМ И ЛЕСООХОТНИЧЬЕ ХОЗЯЙСТВО

УДК 378:911.9

В. Л. Андреева
Белорусский государственный педагогический университет
имени Максима Танка

ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ МУЛЬТИФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УЧЕБНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ТРОПЫ

Экологическая тропа представляет собой одну из форм экологического образования. В статье рассмотрены особенности, цели и задачи экологической тропы, их разновидности. Учебная экологическая тропа дает возможность изучать одновременно естественные и антропогенные объекты. В статье приведен пример разработки учебной экологической тропы для студентов естественнонаучного профиля педагогических учреждений высшего образования. Выбор проектного участка основывался на учете индивидуальных и репрезентативных ландшафтов. Особое внимание уделено этапам организации и их конструктивным особенностям. Количество точек на маршруте, их тематика, продолжительность и протяженность маршрута определялись образовательными целями.

Ключевые слова: учебная экологическая тропа, этапы организации учебной тропы, паспорт учебной экологической тропы, экологическое образование.

V. L. Andreeva
Belarusian State Pedagogical University
named after Maxim Tank

BASES OF DEVELOPMENT OF A MULTIFUNCTIONAL EDUCATIONAL ECOLOGICAL TRAIL

Ecological trail is a form of environmental education. The article discusses the features, goals and objectives of the ecological trail, their varieties. Educational ecological trail makes it possible to study both natural and man-made objects. The article provides an example of the development of an educational ecological trail for students of the natural science profile of pedagogical universities. The selection of the project site was based on the consideration of individual and representative landscapes. Particular attention is paid to the stages of the organization and their design features. The number of points on the route, their subject, the duration and length of the route were determined by educational goals.

Key words: educational ecological trail, the stages of the learning trail, passport educational ecological trails, ecological education.

Введение. Низкий уровень экологической культуры общества и этики природопользования способствует потребительскому отношению к природной среде, ее природным ресурсам. Преодолеть приближающуюся экологическую катастрофу возможно при условии изменения отношения к природе путем распространения экологической, нравственной, трудовой, физической культур. Благоприятное решение данной проблемы возможно при условии развития диалектических основ взаимосвязей естественных природных и антропогенных объектов при прохождении учебной тропы природы.

Первый в мире официальный образовательный маршрут был зарегистрирован в 1925 году в межгосударственном парке Полисейдес на станции Харримантан в США. На территории бывшего СССР широкое распространение учебные экологические тропы получили в начале 60-х годов XX века на территории Эстонии [1]. Учебная тропа, согласно Н. Ф. Реймерсу, представляет собой специально оборудованный путь в «местах, где окружающая природа позволяет экскурсоводам передать знания об естественных явлениях и объектах, создать предпосылки для экологического воспитания и природоохранного мышления» [2]. В зависимости от задач учебной тропы различают несколько ее типов: прогулочно-познавательную, познавательно-туристскую, учебную экологическую, эколого-туристскую [3].

Основная часть. В данной работе представлен материал, разрабатываемый по учебной экологической тропе для студентов факультета естествознания, проходящих учебную практику по дисциплинам «Общее землеведение», «Почвоведение», «Школьный туризм».

Учебная экологическая тропа (УЭТ) представляет собой маршрут, созданный с целью организации и проведения в его границах образовательного процесса, направленного на изучение природных явлений и объектов, антропогенно преобразованных и техногенных ландшафтов, а также основ природопользования, при условии формирования и развития предпосылок для воспитания экологического и природоохранного мышления [4]. В отличие от экологических троп, УЭТ предусматривает системное обучение [5]. Поскольку данная тропа предполагает использование части ее маршрута для проведения учебной практики по школьному туризму (обучению ориентирования на местности и карте, способам обустройства кострищ и др.), а также по другим практикам естественнонаучного направления, то ее следует классифицировать как мультифункциональную учебную тропу. Тропа может выполнять защитные функции, если по ней перемещается местное население, тем самым уменьшает степень площадной деградации окружающего природного ландшафта.

Цель создания УЭТ заключается в формировании взаимодействия между окружающей средой и социумом, в сочетании образовательной, учебно-просветительской с природоохранной функцией, поскольку предполагает локализацию обучающихся на определенной территории (маршруте).

Соответственно, круг задач разрабатываемой учебной тропы направлен на реализацию образовательных, воспитательных, экологических, краеведческих, просветительских, эстетических, рекреационных направлений.

Одной из форм педагогического процесса в границах УЭТ является образовательная экскурсия. Это может быть как традиционная реальная экскурсия [6], так и виртуальная с использованием фото- и видеоматериалов, мобильного гида [7] или интерактивная (онлайн-экскурсия) [8]. Современные технологии на маршруте могут становится точками соприкосновения реального и виртуального пространства, например когда во время традиционной экскурсии экскурсанты используют информацию, считываемую с QR-кодов. Таким образом, образовательная экскурсия может проходить с экскурсоводом или самостоятельно, с использованием приложения «Виртуальный экскурсовод» или схемы маршрута.

Обучающиеся на маршрутах могут принадлежать как к одной возрастной категории, так и к разным. При этом возраст аудитории может существенно различается: от школьников и студентов до взрослого населения.

Обучение может осуществляться как в учебных группах (классах) и микрогруппах (до 5–6 человек), так и индивидуально.

Настоящая УЭТ, как и большинство троп, действует в теплое время года, при условии создания зимних маршрутов потребуется перестройка наглядно-информационного материала и содержания экскурсии.

По видам перемещения чаще представлены пешеходные маршруты, распространены велосипедные, имеют место водные, лыжные и др. По форме перемещения на маршруте различают движения: линейные, кольцевые, радиальными и комбинированные. УЭТ располагают в зоне транспортной доступности (в пределах городского парка, лесопарка, зоны отдыха, зеленой зоны городов и др.), с учетом степени безопасности маршрута.

Как правило, организация учебной тропы проходит несколько этапов: подготовительно-проектировочный, рекогносцировочный, практический и мониторинг [5].

Подготовительно-проектировочный этап представляет собой разработку общего плана работы на основании литературно-картографических источников и фондовых материалов, составление баз данных района и оценку потенциалов, подготовку пилотного проекта маршрута тропы. На этом этапе идет разработка информационных щитов, указателей, маркеров.

Выбор участка маршрута определяется индивидуальными особенностями территории с учетом тематики тропы, она «должна иметь оригинальный стиль, не быть монотонной в отношении окружающих ландшафтов», обладать высоким пейзажно-эстетическим потенциалом [9].

Территория учебно-опытной базы факультета естествознания Белорусского государственного педагогического университета имени Максима Танка расположена в 23 км в северо-западном направлении от г. Минска. Она находится в границах краевых образований Минской возвышенности, что определило относительную сложность рельефа с преобладанием плоских, пологоволнистых и грядово-холмистых комплексов различного размера и конфигурации, отличающихся неравномерностью расчленения. Среди ледниковых аккумулятивных форм рельефа выделяется камовая форма рельефа. Как известно, камы на нашей территории образовались у края покровного ледника при его деградации. Пустоты мертвого

ледникового тела заполнялись перемытым моренным материалом (песком, супесью, суглинками с примесью гравия и прослойками глины), а при стаивании льда был сформирован холмистый рельеф. Характер зернистости материала, отложенного в камах, свидетельствует о чередовании теплых и холодных периодов, так, тонкозернистый материал соответствует более холодному периоду, крупнозернистый – теплому. Высота камового холма в районе УЭТ составляет 247,3 м над уровнем моря, на его плоской вершине расположен триангуляционный пункт.

Антропогенные отложения изучаемой территории сложены преимущественно водно-ледниковыми, моренными, озерно-ледниковыми, аллювиальными, делювиальными и другими отложениями. Они имеют среднюю мощность (120 м). Здесь распространены пески разнозернистые, часто с гравием и галькой, супеси, суглинки, торф. Согласно почвенно-географическому районированию, данная территория относится к Ошмяно-Минскому району Центрального округа Белорусской провинции, где встречаются достаточно редкие для Беларуси бурые лесные почвы, характерны дерново-подзолистые, дерново-подзолистые заболоченные, торфянисто-болотные переходного типа и аллювиальные. Находясь в зоне сопряженности двух крупных геоботанических областей – Евразиатской хвойнолесной (таежной) и европейской широколиственно лесной, окрестности агробиостанции входят, согласно геоботаническому районированию, в подзону дубово-темнохвойных лесов. Однако наряду с достаточно высокой степенью антропогенного влияния здесь характерна вторичная лесная растительность, представленная листвягами брусничными, кисличными, снытьевыми и черничными. На маршруте тропы можно изучать разнообразие видов ландшафтов, типичных для Минской возвышенности, поэтому УЭТ называется «Мини-Минская возвышенность».

По причине высокой плотности дачной застройки, наличия детских оздоровительных лагерей, проведения соревнований по спортивному ориентированию в теплое время года данный район подвергается сильному антропогенному прессингу. Наличие на маршруте как техногенных и антропогеннопреобразованных, так и естественных природных объектов позволяет изучать окружающие ландшафты в их динамике [10].

В зависимости от цели и задач работы протяженность маршрута УЭТ составляет в среднем от 2–3 до 5 км [11].

При подборе точек на маршруте и объектов изучения рекомендуется предварительно оценить природоохранный [12] и эстетический потенциал ландшафтов (многоплановость, аттрактивность, цветовую гамму, перспективу и др.) [13]. Значима информативность, чтобы удовлетворить познавательные компетенции обучающихся [14].

На данной УЭТ предполагается оборудовать 19 тематических остановок, их нумерация и маршрут указаны на рис. 1.

Рис. 1. Учебная экологическая тропа «Мини-Минская возвышенность»

В начальной точке осмотра устанавливается стенд со схемой маршрута, указываются правила посещения тропы, предупреждения и т. п. Н. Л. Глазырина указывает на то, что информативные щиты можно устанавливать в самом начале тропы (с картой-схемой маршрута) и в ее конце, на протяжении всего маршрута использовать указатели с номерами точек [5]. Анализ литературных источников подтверждает, что в большинстве случаев информационные щиты включают сведения физической географии района (горные породы и минералы, особенности формирования рельефа, почвы и т. п.); биогеографии (ареалы распространения видов растений и животных); экологии (например, экологии ручья), истории, краеведения, основ туризма [15, 16].

На каждой точке осмотра предполагается установить информационный щит (аншлаг), чтобы удовлетворить познавательные потребности самостоятельных туристов. Тематика информационных щитов разнообразна: способы ориентирования на местности, горные породы и минералы, история формирования территории Беларуси, основные формы рельефа, погода и климат, почвообразующие породы Беларуси, по-

лугидроморфные и гидроморфные почвы Беларуси, пойма реки Поплав, животный мир Минского района, лесная, луговая, болотная и рудеральная растительность, грибы, легенды и мифы, туристское движение в Беларуси, техногенный и антропогенно преобразованный ландшафт.

Для каждого информационного стенда разрабатывается эскиз. Он должен быть оригинальным, чтобы привлечь внимание к самому стенду. Например, информационный щит о птицах в виде модели краснокнижного обитателя привлечет посетителя к стенду за счет визуализации. Стенд надлежит оформлять в едином стиле, с использованием качественной графики и иллюстраций, информация должна быть краткой, структурированной, содержать 2–3 информативных блока [17]. Дополнительная информация может размещаться с помощью ссылок на QR-код, который можно создать самостоятельно (рис. 2).

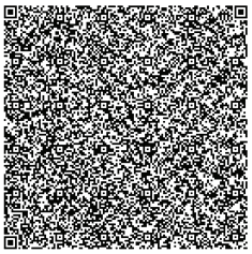


Рис. 2. Пример QR-кода с информацией по бурым лесным почвам

Перед началом работ следует придерживаться правил оформления стендов: в отношении количества слов на панели (от 60 слов, но не более 200), размера шрифта (минимальный размер – до 8 мм или 36 пунктов), количества элементов или фонов (их не должно быть много), выбора основного фона (избегать белого фона, поскольку он бликует), иллюстраций (они должны отображать те объекты, которые на тропе недоступны), декора (он излишен) и т. п. [17, 18].

Проектирование УЭТ предусматривает учет и оценку экологических и морфометрических характеристик ландшафта вдоль маршрута (степень смытости грунта, длина склонов, уклон и т. п.). На этой стадии с целью соблюдения всех технологических и природоохранных норм и правил и с позиции оптимизации маршрута учитывается баланс между эколого-географическими и инженерными требованиями.

Рекогносцировочный этап заключается непосредственно в изучении местности, корректировке пилотного проекта, вносятся поправки в тематику и содержание экскурсий, составляется технологическая карта маршрута, оформляется паспорт УЭТ, корректируется план мероприятий на маршруте. На данном этапе подготавливается паспорт УЭТ и технологическая карта экскурсий.

Паспорт учебной экологической тропы представляет собой официальный документ, дающий юридическое право на ее организацию. В нем прописаны следующие пункты: название, цели и задачи УЭТ, местонахождение, краткое описание и режим использования, допустимая нагрузка, описание точек (объектов) маршрута, правила поведения посетителей, мониторинг и необходимые мероприятия по ее содержанию [18].

Проектируемая УЭТ имеет протяженность линейного маршрута в 3,8 км (она может быть сокращена до 3,1 км), что соответствует практике организации экологических троп, продолжительность экскурсии составляет 4,5 ч (включая привалы). Она предназначена для студентов II–III курсов естественнонаучных факультетов, хотя может быть использована другими возрастными категориями обучающихся.

Экскурсионный маршрут начинается около подножия камового холма, расположенного в северо-северо-восточном направлении в 520 м от остановочного пункта Крыжовка. Обучающиеся проходят в северо-западном направлении 19 точек осмотра. Заканчивается маршрут на агробиостанции «Зеленое». Детальное описание маршрута (проект паспорта УЭТ) приводится в таблице.

Технологическая карта экскурсии составляется на основе литературных данных и анализа фондовых документов, ведутся натурные исследования при закладке маршрута. Она включает координаты обзорных точек, расстояние между ними, время прохождения участков, основное содержимое информации, указания по организации, методические указания [19].

Проект паспорта учебной экологической тропы (УЭТ)

1	Местонахождение	Беларусь, Минская область, Минский район, территория между остановочными пунктами Крыжовка и Зеленое
2	Проезд	До железнодорожной станции ст. Крыжовка электропоездами в направлении «Минск – Беларусь» (координаты станции 53.95 с.ш., 27.32 з.д.); далее пешком 130 м на северо-восток и вдоль ул. Лесная на север 630 м до треугольного перекрестка

Продолжение таблицы

3	Координаты крайних точек маршрута	Начальная точка маршрута: 53.9564,27.3148 Конечная точка маршрута: 53.9816,27.2916
4	Общая протяженность	3,8 км
5	Землепользователь	Государственный
6	Постановления о создании УЭТ	Нет
7	Назначение УЭТ	Обучение
8	Общая характеристика	19 остановочных пунктов
9	Остановочные пункты (ОП)	Тема информационного щита
	ОП № 1. Начальная точка.	Тема: Способы ориентирования на местности. Приводится общая схема маршрута, протяженность маршрута, правила поведения на маршруте, способы ориентирования на местности
	ОП № 2	Тема: История формирования территории Беларуси. Описывается геологическое строение и история геологического развития территории Беларуси в доледниковый и ледниковый период. Расстояние ОП № 1–ОП № 2: 50 м
	ОП № 3	Тема: Основные формы рельефа. Характеризуется основные формы рельефа Беларуси и созданные моренными и водно-ледниковыми отложениями (краевые гряды, камы, друмлины, озы). Расстояние ОП № 2–ОП № 3: 90 м
	ОП № 4	Тема: Почвообразующие породы Беларуси. Перечень почвообразующих пород плейстоцена и голоцена. Описание отложений четвертичного периода (моренных, водно-ледниковых, озерно-ледниковых, перегляциальных и современных (болотных и аллювиальных)). Расстояние ОП № 3–ОП № 4: 80 м
	ОП № 5	Тема: Автоморфные почвы Беларуси. Приводятся диагностические характеристики автоморфного класса почв: дерновых, подзолистых. Описывается бурая лесная почва. Расстояние ОП № 4–ОП № 5: 80 м
	ОП № 6	Тема: Полугидроморфные почвы Беларуси. Приводятся диагностические характеристики полугидроморфного класса почв: полугидроморфные дерновые и полугидроморфные подзолистые. Описывается дерново-подзолистая заболоченная почва. Расстояние ОП № 5–ОП № 6: 200 м
	ОП № 7	Тема: Гидроморфные почвы Беларуси. Приводятся диагностические характеристики гидроморфного класса почв: болотно-подзолистые и органогенные. Описывается торфяно-болотная почва переходного типа. Расстояние ОП № 6–ОП № 7: 250 м
	ОП № 8	Тема: Болотная растительность. Характеризуется азональная болотная растительность в зависимости от типа болот (верховых, переходных, низинных). Расстояние ОП № 7–ОП № 8: 150 м
	ОП № 9	Тема: Животный мир Минского района. Дается структура животного разнообразия Беларуси. Приводятся примеры видов, которых можно встретить на маршруте. Расстояние ОП № 8–ОП № 9: 300 м
	ОП № 10	Тема: Лесная растительность. Характеризуется зональная лесная растительность. Дается описание породного состава и основных типов леса. Расстояние ОП № 9–ОП № 10: 250 м
	ОП № 11	Тема: Грибы. Разнообразие грибов на маршруте: съедобные, несъедобные, ядовитые и краснокнижные виды, встречающиеся на маршруте. Расстояние ОП № 10–ОП № 11: 250 м

Окончание таблицы

	ОП. № 12	Тема: Легенды и мифы. Краеведческое описание района. Расстояние ОП № 11–ОП № 12: 300 м
	ОП № 13	Тема: Туристское движение в Беларуси. История туристского движения Беларуси. Крыжовка – объект спортивного ориентирования. Расстояние ОП № 12–ОП № 13: 300 м
	ОП № 14	Тема: Техногенный ландшафт. Понятие о техногенном ландшафте: виды, объекты. Общая информация о строительном карьере. Расстояние ОП № 13–ОП № 14: 250 м
	ОП № 15	Тема: Антропогенно преобразованный ландшафт. Классификация антропогенно-преобразованных ландшафтов. Виды по направлениям хозяйственного использования. Типы, общая характеристика. Расстояние ОП № 14–ОП № 15: 350 м
	ОП № 16	Тема: Рудеральная растительность. Характеристика рудеральной растительности: пустырей, карьеров и других нарушенных местообитаний. Расстояние ОП № 15–ОП № 16: 200 м
	ОП № 17	Тема: Пойма реки Поплав. Строение речной долины. Морфологические характеристики реки. Расстояние ОП № 16–ОП № 17: 250 м
	ОП № 18	Тема: Луговая растительность. Характеристика растительности суходольных, внепойменных низинных и пойменных лугов. Виды растений пойменного луга. Расстояние ОП № 17–ОП № 18: 300 м
10	ОП № 19. Конечная точка	Тема: Погода и климат. Изучение погоды и климата Беларуси. Общая характеристика климата. Расстояние ОП № 18–ОП № 19: 100 м
11	Время и режим пользования	Ежегодно с 20.03 по 10.10 для проведения учебных исследований, учебный экскурсий
12	Необходимые мероприятия	Укрепление дорожно-тропиночного полотна, оборудование щитов и знаков
13	Ответственный за охрану тропы	Иванов И. И.
14	Шефствующие учреждения	БГПУ
15	Даты, подписи ответственных лиц	
16	Приложения	а) карта-схема маршрута; б) описание экскурсионных объектов

Подача информационного материала может проходить в виде игровых форм, например квеста.

На последующем практическом этапе осуществляется обустройство тропы: собственно тропы (шириной минимум 0,75 м), полосы отчуждения (выделяется с обеих сторон от тропы в зависимости от характера пересеченной местности на расстояние до 2 м), буферной зоны [19]. Участок маршрута, где расположен камовый холм, рекомендуется обустроить ступенями на крутых участках. Данный этап предусматривает размещение информационных щитов, знаков (разрешающих, предупреждающих, запрещающих), маркеров, позволяющих сообщать посетителям тропы об препятствиях, опасностях для беспрепятственного прохождения маршрута, а также способствующих снижению нагрузки на окружающую среду. Маркеры устанавливают вдоль одной стороны дороги на уровне глаз посетителей таким образом, чтобы они были хорошо заметны с большого расстояния, а в случаях пересечения троп выставляют знаки в 10–20 м до и после такого пересечения. Для этого вдоль тропы используют приметные деревья, крупные камни или столбы не ниже 180 см [11]. Мониторинг тропы направлен на выявление изменений объектов природной тропы и предотвращение изменений окружающей среды [20, 21].

Заключение. Учебная экологическая тропа является одной из форм обучения студентов естественнонаучных специальностей

педагогических высших учебных заведений. Разработка УЭТ требует всесторонней оценки природных условий (уникальности, типичности, эстетических характеристик), учета особенностей экологического состояния местности и прогноза изменений в результате эксплуатации, определения нагрузок, изучения интересов и потребностей обучающихся, и реализации всех этапов: от организационных до мониторинга. Использование УЭТ способствует более успешному проведению учебных практик, образовательных экскурсий.

Список литературы

1. Природные учебные тропы / сост. Я. Эйларт. Таллин: Валгус,1986. 278 с.

2. Реймерс Н. Ф. Природопользование: словарь-справочник М.: Мысль, 1990. С. 521.

3. Чижова В. П., Добров А. В., Захлебный А. Н. Учебные тропы природы. М.: Агропромиздат, 1989. 159 с.

4. Туова Т. Г., Теучеж Ф. Д., Мельникова Т. Н. Методика создания эколого-географической тропы и ее использование в образовательном процессе // Биосфера и человек: материалы Междунар. науч.-практич. конф., г. Майкоп, 24–25 окт. 2019 г. / Адыгейский государственный университет. Майкоп, 2019. С. 559–561.

5. Глазырина Н. Л. Организация учебной экологической тропы // Вестник Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета. 2014. № 5. С. 38–49.

6. Экологическая тропа «Сказка Негорельского леса» как объект образовательного туризма / Н. И. Зданович [и др.] // Труды БГТУ. 2017. № 1 (192): Лесное хоз-во. С. 74–78.

7. Касаткина Н. Н. Проектная деятельность в контексте будущей профессиональной деятельности студентов: опыт создания мобильного гида // Образовательные технологии и общество. Вып. 19. 2016. № 2. С. 630–640.

8. Поспелов С. В. Интерактив в экскурсионной деятельности // Научный результат. Технологии бизнеса и сервиса. 2017. № 2 (12). С. 19–22.

9. Nevřelová M., Ružičková J. Educational Potential of Educational Trails in Terms of Their Using in the Pedagogical Process (Outdoor Learning) // Europ. J. of Contemporary Education. 2019. № 8 (3). P. 550–561. DOI: 10.13187/ejced.2019.3.550.

10. Учебная экологическая тропа в системе подготовки будущего учителя: методические рекомендации / сост. П. Я. Кузенкова. М.: Мысль, 1987. 47 с.

11. Куприна Л. Е. Технология разработки туристских маршрутов: учеб. пособие. Тюмень: ТГУ, 2013. 164 с.

12. Токарчук С. М. Геоэкологическая оценка природоохранного потенциала административных районов Беларуси (как один из методов оценки репрезентативности сети особо охраняемых природных территорий) // Псковский регионологический журнал. 2016. № 3 (27). С. 31–45.

13. Абрамова И. В., Стенько С. А. Природный и культурно-исторический потенциал Брестской области для развития экологического туризма // Псковский регионологический журнал. 2017. № 1 (29). С. 76–91.

14. San José trail network toolkit planning & design // Trail program in collaboration with MIG, INC. Final draft. San José, 2014. 104 p.

15. Шапорова Я. А. Грибы как объект показа на экологический тропе // Труды БГТУ. 2016. № 1 (183): Лесное хоз-во. С. 240–243.

16. Квитов А. Н., Куприна Л. Е. Учебная тропа природы как полигон для эколого-краеведческой подготовки студентов географов // Современные проблемы географии России и родного края: тезисы докл. межвуз. науч. конф.; редкол. А. В. Шатных (отв. ред.) [и др.]. Курган: Курганский государственный университет, 1997. С. 72–73.

17. Analysis of notice boards (panels) as general information media in the outdoor mining tourism / K. Weis [et al.] // Acta Montanistica Slovaca. 2019. Vol. 24. No. 3. P. 269–283.

18. Růžička T. Naučme se dělat naučné stezky // Ochrana přírody. 2012. № 3. P. 24–25.

19. Ландшафтное планирование и организация объектов экологического туризма: тексты лекций / сост. О. М. Березко. Минск: БГТУ, 2016. 149 с.

20. Чижова В. П. Регулирование допустимой нагрузки на тропу // Тропа в гармонии с природой: сборник российского и зарубежного опыта по созданию экологических троп. М.: Р. Валент, 2007. С. 85–101.

21. Государственная система стандартизации Республики Беларусь. Правила разработки и обустройства зеленых маршрутов и их частей экологических троп, в том числе на особо охраняемых природных территориях: ТКП 17.12-05-2014 (02120). Введ.: 01.08.2014. Минск: Госстандарт: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, 2014. 40 с.

References

1. *Prirodnyye uchebnyye tropy* [Natural study trails], comp. Ya. Eylart. Tallin, Valgus Publ., 1986. 278 p.
2. Reymers N. F. *Prirodopol'zovaniye: slovar'-spravochnik* [Nature management: dictionary, reference]. Moscow, Mysl' Publ. 1990. 521 p.
3. Chizhova V. P., Dobrov A. V., Zakhlebnyy A. N. *Uchebnyye tropy prirody* [Nature training trails]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1989. 159 p.
4. Tuova T. G., Teuchezh F. D., Mel'nikova T. N. Methodology for creating an ecological and geographical trail and its use in the educational process. *Biosfera i chelovek: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Materials of the interregional scientific and practical conference "Man and the biosphere"]. Maikop, 2019, pp. 189–197 (In Russian).
5. Glazyrina N. L. Organization of an educational ecological trail. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo gumanitarno-pedagogicheskogo universiteta* [Bulletin of the South Ural State Humanitarian and Pedagogical University], 2014, no. 5, pp. 38−49 (In Russian).
6. Zhdanovich N. I., Shaporova A. Ya., Kaplich V. M., Bakhur O. V. Ecological trail "Tale of the Negorelsky forest" as an object of educational tourism. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series I, Forestry, Nature Management and Processing of Renewable Resources, 2017, no. 1 (192), pp. 74–78 (In Russian).
7. Kasatkina N. N. Project activities in the context of future professional activities of students: experience in creating a mobile guide. *Obrazovatel'nyye tekhnologii i obshchestvo* [Educational technologies and society], 2017, vol. 19, no. 2, pp. 630–640 (In Russian).
8. Pospelov S. V. Interactive tour activities. *Nauchnyy rezul'tat. Tekhnologii biznesa i servisa* [Scientific result. Business and service technologies], 2017, no. 2 (12), pp. 19–22 (In Russian).
9. Nevrelova M., Ruzhukchova J. Educational Potential of Educational Trails in Terms of Their Using in the Pedagogical Process (Outdoor Learning). *Europ. J. of Contemporary Education*. 2019, no. 8 (3), pp. 550–561. DOI: 10.13187/ejced.2019.3.550.
10. *Uchebnaya ekologicheskaya tropa v sisteme podgotovki budushchego uchitelya: metodicheskiye rekomendatsii* [Educational ecological path in the system of training future teachers: methodological recommendations], comp. P. Ya. Kuzenkova. Moscow, Mysl' Publ., 1987. 47 p.
11. Kuprina L. E. *Tekhnologiya razrabotki turistskikh marshrutov: uchebnoye posobiye* [Technology for developing tourist routes: tutorial]. Tyumen, TSU Publ., 2013. 164 p.
12. Tokarchuk S. M. Geoecological assessment of the environmental potential of administrative regions of Belarus (as one of the methods for assessing the representativeness of the network of specially protected natural territories). *Pskovskiy regionologicheskiy zhurnal* [Pskov regionological magazine], 2016, no. 3 (27), pp. 31–45 (In Russian).
13. Abramova I. V., Sten'ko S. A. Natural and cultural and historical potential of the Brest region for the development of eco-tourism. *Pskovskiy regionologicheskiy zhurnal* [Pskov regionological magazine], 2017, no. 1 (29), pp. 76–91 (In Russian).
14. San José trail network toolkit planning & design. *Trail program in collaboration with MIG, INC. Final draft*. San José, 2014. 104 p.
15. Shaporova Ya. A. Mushrooms as an object to display on the ecological path. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 1 (183), Forestry, pp. 240–243 (In Russian).
16. Kvitov A. N., Kuprina L. E. Educational nature trail as a testing ground for ecological and historical training of students geographers. *Sovremennyye problemy geografii Rossii i rodnogo kraya: tezisy dokladov mezhvuzovskoy nauchnoy konferentsii* [Abstracts of the Intercollegiate scientific conference "Modern problems of geography of Russia and its native land"]. Kurgan, 1997, pp. 72–73 (In Russian).
17. K. Weis [et al.]. Analysis of notice boards (panels) as general information media in the outdoor mining tourism. *Acta Montanistica Slovaca*, 2019, vol. 24, no. 3, pp. 269–283.
18. Růžička T. Naučme se dělat naučné stezky. *Ochrana přírody* [Nature protection], 2012, no. 3, pp. 24–25 (In Slovak).
19. *Landshaftnoye planirovaniye i organizatsiya ob''yektov ekologicheskogo turizma: teksty lektsiy* [Landscape planning and organization of eco-tourism facilities: texts of lectures], comp. O. M. Beryozko. Minsk, BGTU Publ., 2016. 149 p.
20. Chizhova V. P. Regulating the permissible load on the trail. *Tropa v garmonii s prirodoy: sbornik rossiyskogo i zarubezhnogo opyta po sozdaniyu ekologicheskikh trop* [Trail in harmony with nature: collection of Russian and foreign experience in creating ecological trails]. Moscow, R. Valent Publ., 2007, pp. 85–101.

21. TKP 17.12-05-2014 (02120). Rules for the development and arrangement of green routes and their parts of ecological trails, including on specially protected natural territories. Minsk, Standartinform Publ., 2014. 40 p. (In Russian).

Информация об авторе

Андреева Виктория Леонидовна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры географии и методики преподавания географии. Белорусский государственный университет имени Максима Танка (220089, г. Минск, ул. Советская, 18, Республика Беларусь). E-mail: diversity75@mail.ru

Information about the author

Andreeva Victoriya Leonidovna – PhD (Agriculture), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Geography and Methods of Teaching Geography. Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank (18, Sovetskaya str., 220089, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: diversity75@mail.ru

Поступила 07.04.2020

УДК 630.23

Д. А. Подошвелев
Белорусский государственный технологический университет

СОДЕРЖАНИЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ И АКТИВНОСТЬ ФЕРМЕНТА ПЕРОКСИДАЗЫ В ХВОЕ СОСНЫ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ТЕХНОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

С развитием современного общества возрастающее антропогенное воздействие может вызвать деградацию лесных биоценозов. В санитарно-защитных зонах данное явление может приводить к снижению защитной функции лесных насаждений, находящихся вокруг промышленных предприятий. С целью выявления насаждений с наименьшими негативными последствиями, которые были вызваны деятельностью промышленных предприятий, было изучено состояние ассимиляционного аппарата сосны и ели. Объектами исследования являлись древостои, произрастающие вблизи от нефтеперерабатывающего завода и Новополоцкого завода белково-витаминных концентратов. Аналогичная работа проведена в 50- и 90-летних древостоях сосны и ели, произрастающих в ГЛХУ «Глубокский лесхоз». Исследования показали, что с уменьшением возраста и густоты древостоев сосны и ели в большинстве случаев повышается физиологическая устойчивость к загрязнению воздуха промышленными выбросами и сохраняется стабильность физиологических показателей жизнедеятельности. Это позволяет сделать выводы о том, что более молодые древостои показывают большую устойчивость и лучшую адаптацию к неблагоприятным условиям произрастания по сравнению с более старыми древостоями.

Ключевые слова: сосна, ель, древостой, биоценоз, ассимиляционный аппарат, загрязнение воздуха, хлорофилл, пероксидаза, сера, устойчивость, адаптация.

D. A. Podoshvelev
Belarusian State Technological University

THE CONTENT OF PHOTOSYNTHETIC PIGMENTS AND THE ACTIVITY OF THE ENZYME PEROXIDASE IN PINE NEEDLES IN CONDITIONS WITH INTENSIVE TECHNOGENIC EXPOSURE

The development of modern society and increasing anthropogenic impact can be cause degradation of forest biocenoses. This phenomenon can to decrease the protective function of forest stands in sanitary protection zones of industrial enterprises. In order to identify forest stands with the least negative consequences that were caused by the activities of industrial enterprises, the state of the assimilation apparatus of pine and spruce was studied. The objects of the study were forest stands growing near the petrochemical enterprise and the Novopolotsk plant of protein and vitamin concentrates. A similar work was carried out in 50 and 90 year-old stands of pine and spruce, growing in SEFE “Glubokskiy experimental forestry enterprise”. Studies have shown that with decreasing age and density of pine and spruce stands, in most cases, physiological resistance to air pollution by industrial emissions increases and the physiological indicators of vital signs are stable. This allows us to conclude that younger forest stands show greater resistance and better adaptation to adverse growing conditions compared to older forest stands.

Key words: pine, spruce, forest stand, biocenosis, assimilation apparatus, air pollution, chlorophyll, peroxidase, sulfur, stability, adaptation.

Введение. В последние годы заметно изменилось отношение мирового сообщества к оценке лесных экосистем: леса оцениваются с позиций не только лесоэксплуатации, но их биологической устойчивости против различных факторов внешней среды, а также выполнения ими экологических функций [1, 2, 3]. По В. Г. Стороженко, под устойчивым лесным биоценозом следует понимать сообщество растений, животных, микроорганизмов, которое по числу видов, разнообразию и полноте трофических связей, сложности структурного строения и соответствию климатическим, геоморфологическим и почвенным условиям экотопа сохраняет флуктуирующее постоянство состава организмов и энергетического баланса, а также постоянство восстановительных и деструктивных процессов в течение как минимум нескольких поколений или как угодно долго [4]. При этом в естественных лесах состав и структура лесного биогеоценоза оптимизируются в соответствии с эволюционными законами развития, и их следует рассматривать как естественное формирование у лесного сообщества

качеств устойчивости, как стратегию выживания. Однако эти качества веками вырабатывались в условиях, когда леса не испытывали такого мощного негативного антропогенного воздействия, которое мы наблюдаем в настоящее время.

Известно, что молодому организму свойственна повышенная пластичность, а следовательно, и лучшая приспособляемость к ухудшению условий внешней среды. Поэтому одним из наиболее эффективных путей повышения устойчивости формируемых насаждений ели европейской и сосны обыкновенной против целого ряда неблагоприятных факторов внешней среды может быть снижение возраста рубки при ориентировании на получение балансовой древесины.

Основная часть. Исследование влияния снижения густоты стояния древесных растений на физиологические параметры ассимиляционного аппарата ели и сосны проводилось на стационарных опытных объектах и в условиях сильного негативного антропогенного воздействия на лесные экосистемы, которое имеет место в санитарной зоне Новополоцкого промышленного узла.

Для изучения изменения физиологических параметров функционального состояния ассимиляционного аппарата ели европейской и сосны обыкновенной в мае, июне, июле и августе 2019 г. были взяты образцы хвои на высоте 7–8 м с древесных растений в возрасте 50 и 90 лет, произрастающих в санитарно-защитной зоне г. Новополоцка в непосредственной близости от Новополоцкого завода белково-витаминных концентратов (БВК) и нефтеперерабатывающего завода ОАО «Нафтан» (НПЗ). Аналогичная работа проведена в 50-летних опытных культурах ели и сосны, а также в контрольных насаждениях такого же возраста и в возрасте 90 лет, произрастающих на территории ГОЛХУ «Глубокский опытный лесхоз». Полный перечет объектов выглядит следующим образом:

Группа ПП 1:

а – СЗЗ Новополоцка, 90 лет;

б – СЗЗ Новополоцка, 50 лет.

Группа ПП 2:

а – Глубокское лесничество, 90 км от НПК и БВК, 90 лет;

б – Глубокское лесничество, 90 км от НПК и БВК, 50 лет.

Для оценки состояния устойчивости хвойных древесных растений на них отбирали по три пробных образца хвои на высоте 7–8 м с южной стороны дерева. В отобранных образцах хвои определяли следующие показатели:

– содержание серы;

– содержание и соотношение пулов фотосинтетических пигментов (хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов);

– содержание водорастворимых белков;

– активность фермента пероксидазы.

Анализировали хвою ели и сосны текущего и 1-го годов жизни. Для определения содержания серы в хвое применяли спектрофотометрический метод А. Д. Мочаловой [5], основанный на сжигании измельченного образца с азотнокислым магнием, выведении мешающего окрашиванию железа с помощью хлоргидрата гидроксиламина, осаждении сульфатов хлористым барием и определении экстинции на СФ при длине волны 460 нм.

Содержание фотосинтетических пигментов находили на СФ после извлечения их из растительного образца ацетоном.

Содержание водорастворимых белков определяли по микробиуретовой реакции [6]. Калибровочную кривую строили по стандартному раствору бычьего альбумина.

Активность фермента пероксидазы определяли по модифицированному методу А. Н. Бояркина [7, 8]. Об активности пероксидазы судили по времени образования синей окраски окисленного бензидина.

В ходе проведения исследований физиолого-биохимические анализы выполняли четыре раза. Данные обрабатывали на ЭВМ с расчетом средней арифметической каждого вариационного ряда и средней ошибки измерений.

Так как в составе выбросов завода БВК Новополоцкого промышленного узла доминирует диоксид серы (SO_2), то данный загрязнитель неизбежно поглощается хвоей из атмосферного воздуха, накапливается в мезофилле, цитоплазме и органоидах клетки и оказывает влияние на важнейшие процессы метаболизма.

Исследования показали, что в зоне распространения эмиссий Новополоцкого НПК в хвое ели европейской накапливается значительное количество серы по сравнению с незагрязненной территорией. Наибольшее количество серы в органах ассимиляции ели европейской накапливалось на пробных площадях, непосредственно примыкающих к заводу БВК и НПЗ. В хвое ели европейской в насаждениях старших возрастов накапливалось 0,11–0,18% серы, что почти в 1,5–2,0 раза превышает ее нормальное природное накопление. Так, в опытных культурах на территории Глубокского опытного лесхоза этот показатель не превышает 0,5–0,6%, что в 2–3 раза меньше, чем в санитарно-защитной зоне промышленного узла. В насаждениях ели, примыкающих к промышленным предприятиям, накопилось наименьшее количество серы, что может быть связано со спецификой выбросов данного промышленного предприятия или другими невыясненными причинами.

В контрольных условиях (90 км от НПЗ и БВК) накапливалось в хвое сосны и ели не более 0,05–0,06% серы. Следует отметить, что содержание серы в хвое существенно различается, так как возраст, густота или изреженность насаждений оказывают влияние на состояние физиолого-биохимических показателей ассимиляционного аппарата ели европейской и сосны обыкновенной.

Примечательно, что в хвое 50-летних насаждений плантационного типа, примыкающих к заводу БВК, содержится наименьшее количество серы (0,11%), тогда как в контрольных более густых древостоях этот показатель на 39% выше. Снижение возраста исследуемых насаждений с 90 до 50 лет также способствовало заметному (на 0,03%) уменьшению накопленной серы в хвое древесных растений. Следовательно, не только возраст, но и густота стояния древесных растений могут оказывать влияние на состояние физиолого-биохимических показателей устойчивости ассимиляционного аппарата ели европейской.

В целом насаждения ели в зоне распространения эмиссий НПК характеризуются нарушениями накопления и соотношения пулов фотосинтетических пигментов по сравнению с контрольными аналогами, отобранными на пробных площадях вне зоны загрязнения. Так, в еловых насаждениях, расположенных в зоне влияния эмиссий БВК, зарегистрировано значительное снижение накопления фотосинтетических пигментов в хвое текущего и 1-го года жизни, что сопряжено с высокими уровнями поглощенной серы из атмосферного воздуха. Следует отметить, что по этому показателю несколько большую устойчивость проявили насаждения ели старшего возраста (90 лет) по сравнению с более молодыми (50 лет). В то же время в контрольных 50-летних насаждениях отмечено большее снижение содержания хлорофилла и каротиноидов по сравнению с опытными культурами в связи с большим накоплением серы в хвое (0,18% в контрольных насаждениях ели против 0,11% серы в насаждениях, где проводилось селекционное изреживание).

В насаждениях ели, примыкающих к Новополоцкому нефтеперерабатывающему заводу, четко регистрируется уменьшение накопления фотосинтетических пигментов в хвое ели текущего и 1-го года жизни, причем насаждения старшего возраста оказываются наиболее устойчивыми (т. е. они характеризуются наименьшим уровнем снижения содержания пигментов: на 83,1–98,8% относительно контроля). Более молодые древостои ели здесь менее устойчивы. Суммарное содержание хлорофилла и каротиноидов в хвое разного возраста здесь составляет 62,2–49,4% по отношению к контролю, в то время как в густых (контрольных) насаждениях это содержание намного больше (73,9–74,4% относительно контроля).

Выявленные нами закономерности изменения содержания пигментов в органах ассимиляции хвойных пород в зоне распространения эмиссий Новополоцкого промышленного комплеса близки к описанным в научной литературе изменениям, обнаруженным другими авторами на территориях, подверженных влиянию промышленных газообразных выбросов [7].

В насаждениях ели европейской разного возраста и разной густоты как в непосредственной близости, так и на удалении от Новополоцкого промышленного комплекса обнаружено нарушение и других параметров состояния жизнедеятельности: активности фермента пероксидазы, содержания водорастворимых белков, соотношения показателей активности пероксидазы и содержания белков.

Содержание белков в хвое ели в высоковозрастных посадках (90 лет) во всех вариантах увеличивается по сравнению с контролем (соответственно 106,8–138,7, 134,6–184,6, 131,7–191,9%), что можно рассматривать как результат реализации защитных приспособительных возможностей растений и более высокой устойчивости. В редких 50-летних насаждениях, наиболее близко примыкающих к НПК, содержание белка в хвое ели было соответственно 57,3–98,1 и 80,8–83,2% относительно контроля, что свидетельствует о снижении устойчивости растений. В густых 40-летних посадках содержание белка в хвое было соответственно 89,2–110,0 и 66,0–122,9%. По мере удаления от промышленного узла содержание белков в хвое ели как разреженных, так и густых плантаций больше, чем на меньшем расстоянии от промышленного комплекса. Это коррелирует с пониженным уровнем накопления серы (0,05–0,06%) и, вероятно, большей устойчивостью.

Экологические условия произрастания растений в зоне влияния эмиссий НПК приводят к нарушению активности фермента пероксидазы, в большинстве случаев ее активность ингибируется, что ведет к снижению устойчивости растений из-за нарушения антиоксидантного статуса.

Результаты исследования состояния фотосинтетических пигментов хвои сосны, а также активности фермента пероксидазы и содержания водорастворимых белков показаны в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Содержание и соотношение хлорофилла и каротиноидов в хвое сосны, мг/г массы сырого вещества

Возраст хвои	Хлорофилл *a*	Хлорофилл *b*	Хлорофилл (*a* + *b*)	Каротиноиды
50 лет, ГОЛХУ «Глубокский опытный лесхоз»				
Текущего года	0,4568 ± 0,0035	0,1303 ± 0,0008	0,587	0,2939 ± 0,0073
1-го года жизни	0,5329 ± 0,0007	0,1599 ± 0,0001	0,693	0,2803 ± 0,0002
90 лет, ГОЛХУ «Глубокский опытный лесхоз»				
Текущего года	0,4086 ± 0,0125	0,1158 ± 0,0037	0,525	0,2698 ± 0,0116
1-го года жизни	0,4624 ± 0,0021	0,1412 ± 0,0004	0,603	0,2487±0,0026
50 лет, СЗЗ НПЗ				
Текущего года	0,4190 ± 0,019	0,1196 ± 0,0111	0,539	0,2324 ± 0,0227
1-го года жизни	0,5030 ± 0,0464	0,1556 ± 0,0146	0,659	0,2300 ± 0,0209
90 лет, СЗЗ НПЗ				
Текущего года	0,4017 ± 0,0159	0,1147 ± 0,0041	0,516	0,2680 ± 0,0114
1-го года жизни	0,4591 ± 0,0017	0,1367 ± 0,0005	0,596	0,2460 ± 0,0023

Таблица 2

Активность фермента пероксидазы и содержание водорастворимых белков в хвое сосны

Возраст хвои	Активность пероксидазы, $E/(г \cdot с^{-1})$	Содержание белков, мг/100 г сырого вещества	Отношение активности пероксидазы к содержанию белков	Отношение содержания белков к активности пероксидазы
50 лет, ГОЛХУ «Глубокский опытный лесхоз»				
Текущего года	1,186 ± 0,025	14,900 ± 0,115	0,080	12,563
1-го года жизни	3,089 ± 0,089	22,875 ± 0,222	0,135	7,405
90 лет, ГОЛХУ «Глубокский опытный лесхоз»				
Текущего года	1,739 ± 0,008	12,075 ± 0,096	0,144	6,944
1-го года жизни	2,168 ± 0,036	13,700 ± 0,115	0,158	6,319
50 лет, СЗЗ НПЗ				
Текущего года	1,170 ± 0,010	15,650 ± 0,129	0,075	13,376
1-го года жизни	2,334 ± 0,021	19,100 ± 0,115	0,122	8,183
90 лет, СЗЗ НПЗ				
Текущего года	1,236 ± 0,012	12,763 ± 0,124	0,136	6,741
1-го года жизни	1,978 ± 0,038	13,121 ± 0,102	0,145	6,012

Анализ состояния фотосинтетических пигментов хвои сосны показал, что наибольшая концентрация хлорофилла (Х (*a* + *b*)) наблюдается в хвое в 50-летнем опытном древостое в Глубокском лесничестве, что превышает 90-летние и 50-летние густые древостои на 12–14 и 5–8% соответственно.

По содержанию каротиноидов тенденция сохранятся. В результате этого наибольшее суммарное количество пигментов наблюдается в хвое опытных 50-летних древостоев. Так, молодые редкие древостои превосходят по данному показателю 90-летние древостои на 10–13% и 50-летние густые – на 9–12%.

Активность пероксидазы в хвое 1-го года жизни в 50-летних древостоях сосны на 24–30% превысила данный показатель 50- и 90-летних древостоев. Содержание белков в 50-летних древостоях на 19–40% превышает показатель 90-летних древостоев.

Заключение. По результатам исследований можно сделать следующие предварительные выводы:

– содержание серы в хвое увеличивается по мере приближения к Новополоцкому НПК и служит индикатором загрязнения атмосферного воздуха диоксидом серы;

– загрязнение атмосферного воздуха является одним из факторов нарушения физиологических показателей ассимиляционного аппарата;

– повышенный уровень накопления серы в хвое относительно его нормального природного уровня аккумуляции, возможно, приводит к нарушению физиолого-биохимических показателей: содержания и соотношения пулов хлорофилла и каротиноидов, водорастворимых белков и активности фермента пероксидазы;

– более молодые сосны показывают большую устойчивость к неблагоприятным условиям произрастания, лучшую адаптацию и стабильность физиологических показателей жизнедеятельности по сравнению с более старыми древостоями.

Список литературы

1. SDG synergy between agriculture and forestry in the food, energy, water and income nexus: Reinventing agroforestry? / M. Van Noordwijk [et al.] // Curr. Opin. Environ. Sustain. 2018. No. 34, P. 33–42.
2. Effectiveness of Community Forest Management at reducing deforestation in Madagascar / R. A. Rasolofosan [et al.] // Biological Conservation. 2014. Vol. 184. P. 477–458.
3. Писаренко А. И. Экологические аспекты управления лесами // Лесное хозяйство. 2000. № 3. С. 8–11.
4. Стороженко В. Г. Содержание понятия устойчивого лесного сообщества // Состояние и мониторинг лесов на рубеже XXI века: материалы Междунар. науч.-практ. конф., 24–26 нояб. 1998 г. Минск, 1998. С. 233–235.
5. Мочалова А. Д. Спектрофитометрический метод определения серы в растениях // Сельское хозяйство за рубежом. 1995. № 4. С. 17–21.
6. Шлык А. А., Прудникова И. В., Парамонова Т. К. Влияние ингибиторов сульфгидрильных групп на биосинтез протохлорофиллида и хлорофиллов *a* и *b* // Биосинтез и состояние хлорофиллов в растениях. Минск: Наука и техника, 1998. 284 с.
7. Илькун Г. М. Загрязнители атмосферы и растения. Киев: Наукова думка, 1978. 112 с.
8. New and classic families of secreted fungal heme peroxidases / M. Hofrichter [et al.] // Applied Microbiology and Biotechnology. 2010. Vol. 87, No. 3. P. 871–897.

References

1. Van Noordwijk M., Duguma L. A., Dewi S., Leimona B., Catacutan D. C., Lusiana B., Öborn I., Hairiah K., Minang P. A. SDG synergy between agriculture and forestry in the food, energy, water and income nexus: Reinventing agroforestry? *Curr. Opin. Environ. Sustain*, 2018, no. 34, pp. 33–42.
2. Rasolofosan R. A., Ferraro P. J., Jenkins C. N., Jones J. P. G. Effectiveness of Community Forest Management at reducing deforestation in Madagascar. *Biological Conservation*, 2014, vol. 184, pp. 477–458.
3. Pisarenko A. I. Ecological aspects of forest management. *Lesnoe hozyaystvo* [Forestry], 2000, no. 3, pp. 8–11. (In Russian)
4. Storozhenko V. G. The content of the concept of sustainable forest community. *Materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. ("Sostoyanie i monitoring lesov na rubezhe XXI veka")* [Materials of International scientific conference ("State and monitoring of forests at the turn of the XXI century")]. Minsk, Institute of Experimental Botany National Academy of Sciences of Belarus, 1998, pp. 233–235 (In Russian).
5. Mochlova A. D. Spectrophytometric method for determination of sulfur in plants. *Sel'skoe hozyaystvo za rubezhom* [Agriculture abroad], 1995, no. 4, pp. 17–21 (In Russian).
6. Shlyk A. A., Prudnikova I. V., Paramonova T. K. The effect of sulfhydryl group inhibitors on the biosynthesis of protochlorophyllide and chlorophyll a and b. *Biosintez i sostoyanie khlorofillov v rasteniyakh* [Biosynthesis and state of chlorophyll in plants]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1998, pp. 284 (In Russian).
7. Ilkun G. M. *Zagryazniteli atmosfery i rasteniya* [Air pollutants and plants]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1978, 112 p.
8. Hofrichter M., Ullrich R., Pecyna M. J., Liers C., Lundell T. New and classic families of secreted fungal heme peroxidases. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, vol. 87, no. 3, pp. 871–897.

Информация об авторах

Подошвелев Дмитрий Александрович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры туризма, природопользования и охотоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: podoshv@gmail.com

Information about the authors

Podoshvelev Dmitry Aleksandrovich – PhD (Agriculture), Assistant Professor, the Department of Tourism, Nature Management and Game Management. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: podoshv@gmail.com

Поступила 03.04.2020

УДК 338.48; 504

Я. А. Шапорова, О. В. Бахур
Белорусский государственный технологический университет

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД В СОЗДАНИИ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ ДЛЯ ПЧЕЛОВОДСТВА И ТРАВНИЧЕСТВА

Одним из инструментов выполнения целей Национальной стратегии устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь является реализация Государственной программы развития туризма, приоритетным направлением которой выступает экологический туризм. Государственное регулирование различных аспектов правового и экономического управления этим направлением деятельности позволило добиться определенных успехов по привлечению туристов как из числа городских жителей нашей страны, так и из-за рубежа. По данным результатов опросов русскоязычного сегмента журнала National Geographic Traveler в 2016 и 2018 годах в номинации «Агротуризм» Республика Беларусь была признана лучшим местом для этого вида отдыха. В значительной степени этому способствовало сохранение некоторых традиционных промыслов и обрядов, которые позволяют разнообразить спектр предоставляемых туристам продуктов и услуг. Согласно Национальному докладу о выполнении Конвенции о биологическом разнообразии, на территории республики сохранились уникальные формы традиционных промыслов: травничество и бортничество. Эти направления деятельности требуют специфических знаний от занимающихся ими людей, а также достаточного ресурсного потенциала для дальнейшего развития.

Пчеловодство и такое его направление, как бортничество, а также травничество востребованы на рынке туристических услуг и продуктов, однако их природная ресурсная база, в связи с усиливающимися неблагоприятными факторами, начинает истощаться. Для предотвращения неблагоприятных последствий предлагается комплексный подход в решении этого вопроса. С одной стороны, пчеловодство получает кормовую базу для пчелосемей в неблагоприятные периоды, с другой – возделываются востребованные виды растений как в агротуризме, так и для замещения позиций по импорту лекарственного и пряно-ароматического сырья растительного происхождения.

Ключевые слова: экотуризм, агротуризм, пчеловодство, травничество, виды растений, лекарственные растения, пряно-ароматические растения, растительные ресурсы.

Ya. Shaporova, A. Bakhur
Belarusian State Technological University

TO THE QUESTION ABOUT THE RAW MATERIAL BASE FOR THE DEVELOPMENT OF HUMAN BEARING AND HERBALITY

One of the tools to achieve the goals of the National Strategy for Sustainable Socio-Economic Development of the Republic of Belarus is the implementation of the State Tourism Development Program, which prioritizes ecological tourism. State regulation of various aspects of legal and economic management of this area of activity has made it possible to achieve certain success in attracting tourists, both from among the urban residents of our country, and from abroad. According to the results of surveys of the Russian-speaking segment of the National Geographic Traveler magazine in 2016 and 2018 in the nomination “Agrotourism” the Republic of Belarus was recognized as the best place for this type of vacation. To a large extent, this was facilitated by the preservation of some traditional crafts and ceremonies, which make it possible to diversify the range of products and services provided to tourists. According to the National Report on the Implementation of the Convention on Biological Diversity, unique forms of traditional crafts were preserved in the republic: herbalism and traditional beekeeping. These areas of activity require specific knowledge from the people involved in them, as well as sufficient resource potential for further development.

Traditional beekeeping and herbalism are in demand on the market of tourism services and products, however, their natural resource base, due to increasing adverse factors, is beginning to deplete. To prevent adverse effects, an integrated approach to addressing this issue is proposed. On the one hand, beekeeping receives a forage base for bee colonies in unfavorable periods. On the other hand, grown plants can be used in authentic herbalism as well as to replace positions on the import of medicinal and aromatic raw materials of plant origin.

Key words: ecotourism, agrotourism, beekeeping, herbalism, plant species, medicinal plants, aromatic plants, plant resources.

Введение. Согласно национальному докладу о выполнении Конвенции о биологическом разнообразии на территории нашей страны сохранились такие формы традиционных народ-

ных промыслов, как травничество и бортничество (форма пчеловодства) [1, 2].

Бортничество – это уникальное явление, которое сейчас можно встретить преимущественно на Полесье. В настоящее время этот вид народных промыслов представляет сохранившееся нематериальное культурное наследие наших предков. Совместно с польскими учеными была сформирована и подана на рассмотрение заявка о внесении этого вида традиционной деятельности белорусов в Список наследия ЮНЕСКО. Ранее в Список нематериального культурного наследия были включены Будславский фэст и обряды: «Калядныя цары» и «Юрьевский хоровод» [3].

По сведениям международных организаций, официально в 2013 г. городское население Земли превысило сельское. Тенденция к сокращению сельского населения на территории Беларуси уже начала проявляться в первые десятилетия после окончания Второй мировой войны. На конец 2019 г., согласно данным Национального статистического комитета Республики Беларусь, городское население составило 78,5%, а на долю сельских жителей приходится лишь 21,5%. Такой дисбаланс в структуре населения приводит к нарушению информативных потоков от старшего поколения к младшему. Причем в первую очередь «теряются» знания о природе в целом и отдельных ее составляющих в частности [4].

Рост доли городского населения предопределил спрос на различные виды экологического туризма среди всех возрастных категорий потенциальных потребителей. Жители крупных городов стремятся сами получить недостающие знания и познакомить детей с традиционным укладом белорусской деревни. Поэтому данный вид туризма развивается у нас в стране достаточно успешно, о чем свидетельствуют результаты опросов русскоязычного сегмента журнала National Geographic Traveler в 2016 и 2018 годах в номинации «Агротуризм», по которым Беларусь была признана лучшим местом для этого вида отдыха [5].

Анализ перечня услуг, которые предоставляются на агроусадьбах, а также у таких, уже ставших широко известными за пределами республики, участников туристического рынка услуг, как ГПУ «Березинский биосферный заповедник», национальные парки (ГПУ «НП «Беловежская пуща», ГПУ «НП «Припятский», ГПУ «НП «Браславские озера», ГПУ «НП «Нарочанский»), музейный комплекс старинных народных ремесел и технологий «Дудутки», традиционная полесская деревня Кудричи, агротуристический комплекс «Гарадзенскі маентак «Каробчыцы» и др., показал, что в структуре предлагаемых услуг широко используются продукты пчеловодства и травничества. Данные объекты не исчерпали свой потенциал для создания на их базе новых туристических продуктов, однако определился ряд ограничений, которые не позволяют их еще активнее вовлекать в туристический бизнес.

Основная часть. Пчеловодство – древнейший вид хозяйственной деятельности человека на территории нашей страны – своими истоками уходит в глубокую древность. Без медоносной пчелы сложно получить высокие урожаи в плодоводстве и овощеводстве. После Великой Отечественной войны пчеловодство в Беларуси пришлось восстанавливать заново. Благодаря кропотливому труду в БССР к 1957 г. насчитывалось 542 тыс. пчелосемей, тогда как уже в наши дни, начиная с 2010 г., их количество колеблется в пределах 220–250 тыс.

Летом 2019 г. в Беларуси произошла очередная волна массовой гибели пчел. В глобальном масштабе этот процесс был запущен до начала Второй мировой войны. В этой связи высказывание А. Эйнштейна в журнале «Canadian Bee Journal» 1941 г.: «Человек может прожить без кислорода три минуты, без воды три дня, а без пчел четыре года», – приобретают угрожающую реальность. Программа ООН по окружающей среде (ЮНЕП) забила тревогу по поводу сокращения численности пчелосемей более десяти лет назад. Российские ученые-пчеловоды начали поднимать эти вопросы в своих исследованиях еще в начале двухтысячных, но тогда их предупреждения не казались обоснованными. На сегодняшний день статистические данные за последние 50 лет свидетельствуют о почти двукратном сокращении количества пчелиных семей в мире. На каждом гектаре при этом осталось работать в среднем 10% имевшихся ранее пчел.

По данным The Daily Telegraph в США каждую зиму исчезает около 30% пчелосемей, хотя до этого холодное время года не могли пережить в среднем лишь около 10%. В Европе эти цифры чуть меньше. Причины гибели пчелиных семей носят комплексный характер.

Одним из факторов, влияющих на сложившуюся ситуацию, является глобальное изменение климата, которое проявляется как в аномальных погодных условиях, так и в изменении количественного и качественного состава сырьевой базы для пчел и ее доступности в сезоне. В немалой степени это обусловлено сокращением площади лугов вследствие их зарастания древесно-кустарниковой растительностью и усилением бурьянизации фитоценозов. Эти процессы также негативно сказываются и на заготовке сырья, используемого в традиционном травничестве.

Сырьевая база является одним из основных факторов успешного пчеловодства. Кормовые ресурсы пчел в Беларуси состоят из возделываемых и естественных (дикорастущих) медоносных и пыльценосных растений. Пчелиные семьи собирают с растений нектар и пыльцу на протяжении всего активного сезона в соответствии с потребностями семьи в этих продуктах. Отсутствие какого-нибудь одного элемента понижает жизнеспособность пчелиной семьи. Коэволюция медоносных пчел и цветковых растений обусловила в семье саморегулирующуюся систему, обеспечивающую поступление и расходование необходимого количества корма.

Пищевой цикл пчел детерминирован и проходит строго в соответствии с временными интервалами. Цветение растений в течение сезона сбора нектара и пыльцы происходит неодновременно и неравномерно. Оно продолжается с ранней весны (как правило, с последних чисел апреля) и до конца сентября. В нашей стране медоносных растений насчитывается более 1000 видов, но производственное значение имеют около 200–250. В связи с тем что в последние годы все чаще происходят погодные аномалии (очень жаркие и засушливые конец мая – начало июня, а затем холодные и дождливые первая – вторая декада июля и т. п.), пчелосемьи не получают достаточного питания, что в конечном итоге приводит их к массовой гибели. Для снижения числа подобных явлений можно рекомендовать совершенствование кормовой базы путем создания плантаций культивируемых видов-медоносов, которые смогут компенсировать неблагоприятные периоды в жизни пчелиных семей.

Закладка доступных плантаций растений-медоносов благоприятно скажется и на пчелиных семьях, обитающих в бортях. В то же время значительная часть этих растений активно используется в традиционном травничестве.

Одним из возможных комплексных решений обеспечения сырьевой базой как пчеловодства, так и травничества может быть создание своеобразных кластеров. Такой подход согласуется с современной концепцией туристического кластера, под которым обычно понимают группы предприятий, сконцентрированных географически в пределах региона, которые совместно используют туристические ресурсы, специализированную туристическую инфраструктуру, локальные рынки труда, осуществляют совместное управление и маркетинговую деятельность [6]. Именно кластерный подход в Чехии, Швейцарии, в приальпийских регионах Италии и Австрии позволил стать им лидерами в развитии экотуризма, а также являться лучшими поставщиками высококачественного меда и растительного сырья для фармакологии, косметологии и т. п.

Культивирование растений на территории нашей страны, которые не только имеют ценность как медоносы, но и являются лекарственными, пищевыми, пряно-ароматическими и декоративными, позволит восполнить нишу, которая на сегодняшний день занята поставщиками из других стран. Доля импортного лекарственного и пряно-ароматического растительного сырья на белорусском рынке сейчас составляет более 50% [7].

Развитие собственного производства сырья, в котором будет сделан упор на использование важнейших, в том числе и местных растений, согласуется с концепцией Департамента по безопасности продуктов питания, зоонозам и пищевым болезням ВОЗ (2007), в которой сказано, что наиболее безопасными и полезными являются те продукты, которые выращены в радиусе не более 300 км от места жительства потенциального потребителя.

Научно-практический задел в этом направлении создан Лабораторией биоразнообразия растительных ресурсов ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларуси», в котором собрана уникальная коллекция пряно-ароматических и лекарственных растений, насчитывающая более 500 видов и разновидностей. Наибольшим числом видов представлены группы: лекарственные (159 видов), пищевые (91 вид), медоносные (82 вида) и декоративные (108 видов) [8].

Проанализировав потенциал различных видов растений для бортничества, травничества и других видов деятельности, считаем, что наиболее востребованными могут являться: лаванда узколистная (английская) (*Lavandula angustifolia* Mill.), род мордовник (*Echinops* L.) в целом и его виды: М. шароголовый (*E. sphaerocephalus* L.), М. обыкновенный (*E. ritro* L.), М. широколистный (*E. latifolius* Tausch), М. русский (*E. ruthenicus* M. Bieb.), шалфей мутовчатый (*Salvia verticillata* L.), ш. луговой (*S. pratensis* L.), ш. лекарственный (*S. officinalis* L.), змееголовник молдавский (*Dracocephalum moldavicum* L.), иссоп лекарственный (*Hyssopus officinalis* L.), расторопша пятнистая (*Silybum marianum* (L.) Gaertn.), кипрей узколистный (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.), душица обыкновенная (*Origanum vulgare* L.), огуречная трава (огуречник лекарственный) (*Borago officinalis* L.) и др.

Заключение. Культивирование указанных видов растений, как на приусадебных участках, так и в фермерских хозяйствах и, безусловно, на агроусадьбах, улучшит кормовую базу для пчелосемей, обеспечит необходимым сырьем для традиционных травяных, пряно-ароматических и лекарственных сборов, что в конечном

итоге повысит конкурентноспособность рынка услуг экологического туризма.

Развитие этого направления деятельности в промышленных масштабах требует поиска дополнительных инвестиций, так как посевы многолетних лекарственных и пряно-ароматических растений начинают приносить доход через два-три года, а первый сезон требуют только вложений. Вместе с тем реализация кластерного подхода разрешит комплексно и многогранно использовать такие плантации растений, что само по себе уже позволит быстрее окупить производственные издержки, а малым субъектам хозяйствования, таким как агроусадьбы, даст возможность разнообразить комплекс оказываемых услуг и привлечь больше клиентов.

Список литературы

1. Стратегия по сохранению и устойчивому использованию биологического разнообразия на 2011–2020 годы. Минск: Белсэнс, 2010. 30 с.

2. Биологическое разнообразие Беларуси. Состояние, охрана, устойчивое использование: шестой отчет о выполнении Республикой Беларусь Конвенции о биологическом разнообразии / ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам». Минск: ООО «Альтиора Форте», 2019. 70 с.

3. Лесное бортничество Беларуси и Польши может попасть под опеку ЮНЕСКО [Электронный ресурс] // Belarus24.by. Национальная телерадиокомпания Республики Беларусь, 2020. URL: https://belarus24.by/news/culture/lesnoe-bortnichestvo-belarusi-i-polshi-mozhet-popast-pod-opeku-yunesko/ (дата обращения: 10.02.2020).

4. Шапорова, Я. А. Грибы как объект показа на экологической тропе // Труды БГТУ. 2016. № 1 (183). Лесное хоз-во. С. 240–243.

5. Беларусь стала лучшей страной для агротуризма по версии российского National Geographic [Электронный ресурс] // БЕЛТА. URL: https://www.belta.by/society/view/belarus-stala-luchshej-stranoj-dlja-agroturizma-po-versii-national-geographic-320659-2018 (дата обращения: 10.02.2020).

6. Клицунова В. А., Борисенко Н. М., Аношко Я. И. Агроэкотуризм: учеб.-метод. пособие. Минск: РИПО, 2014. 132 с.

7. Карачевская Е. В. Прогноз территориального размещения лекарственной отрасли в системе агропромышленного комплекса Республики Беларусь // Вестник БГСХА. 2019. № 3. С. 25–29.

8. Основные результаты научных и прикладных исследований лаборатории биоразнообразия природных ресурсов // Официальный сайт Центрального ботанического сада НАН Беларуси. URL: http://www.cbg.org.by/index.php/structure/lbpr/results/medicinal (дата обращения: 10.02.2020).

References

1. *Strategiya po sohraneniyu i ustoychivomu ispol'zovaniyu biologicheskogo raznoobraziya na 2011–2020 gody* [Strategy for the conservation and sustainable use of biological diversity 2011–2020]. Minsk, Belsens Publ., 2010. 30 p.

2. *Biologicheskoye raznoobraziye Belarusi. Sostoyaniye, okhrana, ustoychivoye ispol'zovaniye: shestoy otchet o vypolnenii Respublikoy Belarus' Konventsii o biologicheskom raznoobrazii* [The biological diversity of Belarus. Status, protection, sustainable use: sixth report on the implementation by the Republic of Belarus of the Convention on biological diversity]. Minsk, Al'tiora Forte Publ., 2019. 70 p.

3. *Lesnoye bortnichestvo Belarusi i Pol'shi mozhet popast' pod opeku YUNESKO* [Forest beekeeping of Belarus and Poland may fall under the tutelage of UNESCO]. Available at: https://belarus24.by/news/culture/lesnoe-bortnichestvo-belarusi-i-polshi-mozhet-popast-pod-opeku-yunesko/ (accessed 10.02.2020).

4. Shaporova Ya. A. Mushrooms as a showcase of an ecological trail. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 1: Forestry, pp. 240−243 (In Russian).

5. *Belarus' stala luchshey stranoy dlya agroturizma po versii rossiyskogo National Geographic* [Belarus became the best country for agritourism according to the Russian National Geographic]. Available at: https://www.belta.by/society/view/belarus-stala-luchshej-stranoj-dlja-agroturizma-po-versii-national-geographic-320659-2018 (accessed 10.02.2020).

6. Klitsunova V. A., Borisenko N. M., Anoshko Ya. I. *Agroekoturizm: ucheb.-metod. posobiye* [Agroecotourism: textbook]. Minsk, RIPO Publ., 2014. 132 p.

7. Karachevskaya E. V. Forecast of the territorial distribution of the drug industry in the agricultural system of the Republic of Belarus. *Vestnik BGSKhF* [Bulletin of BSAA], 2019, no. 3, pp. 25−29 (In Russian).

8. *Osnovnyye rezul'taty nauchnykh i prikladnykh issledovaniy laboratorii bioraznoobraziya prirodnykh resursov* [The main results of scientific and applied research of the biodiversity laboratory of natural resources]. Available at: http://www.cbg.org.by/index.php/structure/lbpr/results/medicinal (accessed 10.02.2020).

Информация об авторах

Шапорова Ядвига Александровна – кандидат биологических наук, заведующая кафедрой туризма, природопользования и охотоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: shaparava@yandex.by

Бахур Олег Владимирович – кандидат биологических наук, доцент кафедры туризма, природопользования и охотоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: oleg_bahur@tut.by

Information about the authors

Shaporova Yadviga – PhD (Biology), Head of the Department of Tourism, Nature Management and Game Management. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shaparava@yandex.by

Bakhur Aleh – PhD (Biology), Assistant Professor of the Department of Tourism, Nature Management and Game Management. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: oleg_bahur@tut.by

Поступила 21.03.2020

ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС. ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

УДК 504.054:630.11

В. С. Столбин, С. А. Голякевич
Белорусский государственный технологический университет

АНАЛИЗ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫХ МАШИН И ТЕХНОЛОГИЙ НА ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

В статье рассмотрена проблема комплексной оценки антропогенного воздействия лесопромышленных машин и технологий их применения на различные экологические характеристики лесного фонда: загрязнение приземных слоев атмосферы, нарушения биоценозов, повреждение напочвенного покрова. Произведен анализ некоторых независимых исследований в области оценки и снижения антропогенного влияния лесных машин. Выделены основные категории природных компонентов, воздействие машин на которые приводит к уплотнению почвы, нарушению фильтрационных и водных характеристик почвы, увеличению приземных концентраций продуктов сгорания топлива, повреждению и нарушению морфологического состава древостоев, нарушению постоянного равновесия между показателями экосистем леса. Для каждого из этих компонентов приведены организационные и технические мероприятия, которые предположительно могут снизить уровень негативного воздействия при освоении лесосек механизированными средствами. Отмечены пути дальнейших исследований с целью образования единой универсальной методики оценки. Сделано предположение о перспективах поиска единого показателя уровня негативного воздействия, который потенциально может являться целевым фактором при планировании освоения лесосек и проектировании конструкций лесных машин для различных природных и экономических условий.

Ключевые слова: лесозаготовка, антропогенное влияние, лесные машины, характеристики почвы, морфологический состав древостоев.

V. S. Stolbin, S. A. Golyakevich
Belarusian State Technological University

ANALYSIS OF SCIENTIFIC RESEARCH IN THE ASSESSMENT OF ECOLOGICAL INFLUENCE OF FORESTRY MACHINES AND TECHNOLOGIES ON FOREST ECOSYSTEMS

The article considers the problem of a comprehensive assessment of the anthropogenic impact of forestry machines and their use technologies on various characteristics and indicators of the ecological environment of the forest. The analysis of some independent researches in the assessment and reduction of the anthropogenic impact of forest machines. The main categories of natural components are identified, the impact on which allows us to assess the overall level of negative impact: soil compaction, filtration and water characteristics of the soil, surface concentrations of fuel combustion products, damage and disturbance of the morphological composition of forests, violation of the constant equilibrium between indicators of forest ecosystems. For each of these components, organizational and technical measures are presented that can presumably reduce the level of negative impact during the development of cutting areas by mechanized means. Ways of further research with the aim of forming a unified universal assessment methodology are noted. An assumption is made about the prospects of finding a single indicator of the level of negative impact, which is a regulatory factor in planning the development of a cutting area and designing forest machine designs for various natural and economic conditions.

Key words: logging, anthropogenic impact, forest machines, soil characteristics, morphological composition of forest stands.

Введение. В современном понятии машина – это технический объект, состоящий из взаимосвязанных функциональных узлов и механизмов, в котором происходят процессы преобразования различных видов энергии [1].

Лесопромышленные машины (далее – лесные машины) представляют собой сложные системы по преобразованию энергии, оборудованные специализированными устройствами для выполнения определенных видов работ. Различные технические и операционные особенности использования лесных машин и сопутствующие им физические и химические процессы обеспечивают обширный ряд изменений в природных компонентах лесной экосистемы, которые без антропогенного вмешательства находятся в состоянии гомеостаза, т. е. в постоянном процессе саморегуляции, направленном на сохранение динамического равновесия показателей среды.

Комплексный подход к изучению факторов негативного влияния лесных машин на лесные экосистемы позволяет выделить основные группы природных компонентов, претерпевающих такие воздействия. Приведем схему таких факторов (рис. 1) [2].

Как видно из рис. 1, лесозаготовка на всех этапах своего проведения оказывает широкий спектр воздействия на различные компоненты экосистемы леса, к которым относятся: почва, атмосфера, водные ресурсы, биоценозы.

Цель работы – провести анализ известных исследований в области оценки экологического воздействия лесопромышленных машин и технологий на лесные экосистемы, обобщить их и определить актуальные направления дальнейших исследований в данной области.

Основная часть. Проанализируем современные методы оценки антропогенного воздействия от применения лесохозяйственной техники. Для этого воспользуемся независимыми научными исследованиями в различных областях природопользования, лесного хозяйства и машиностроения, проведем их категорирование по признаку влияния на определенную группу природных компонентов, сравним используемые методы и выделим основные результаты, полученные в процессе их проведения.

Первую группу формируют факторы, затрагивающие показатели качества атмосферы при эксплуатации лесной техники. Применение машин, оснащенных двигателями внутреннего сгорания, приводит к образованию побочных химических продуктов неполного сгорания топлива и розливов горюче-смазочных веществ. Их воздействие на приземные слои атмосферы и на процентное соотношение компонентов воздушной среды отражены в научных работах [2–4].

Расчеты, приведенные в исследовании [2], показали различную антропогенную нагрузку на атмосферный воздух лесных экосистем Хабаровского края, связанную с выбросами продуктов горения топлива лесозаготовительных машин. Однако во всех измерениях были зафиксированы превышения экологических нормативов по сернистому ангидриду (SO_2) и диоксиду азота (NO_2), что негативно сказывается на всех видах растительности, произрастающих на территориях лесосеки и территориях, прилегающих к ним.

Различность антропогенной нагрузки, выявленная в данном исследовании [2], обусловлена разными технологиями заготовки древесины и соответственно различным перемещением лесозаготовительных машин по территории лесосеки.

По результатам исследования [3] удалось установить различные уровни приземных концентраций диоксида азота (NO_2) в зависимости от применяемой технологии лесозаготовки. С точки зрения наиболее рационального использования природных ресурсов и сохранения постоянства экологических систем наиболее приемлемой технологией лесозаготовок, в условиях исследования, является хлыстовая лесозаготовка второго типа, где значения диоксида азота (NO_2) лежат в диапазоне от 0,76 долей ПДК (по гигиеническим нормативам) до 76 долей ПДК (по экологическим нормативам). Наиболее отрицательно влияющей на атмосферный воздух технологией лесозаготовок оказалась хлыстовая технология первого типа, при выполнении которой были зафиксированы превышения ПДК приземных концентраций по диоксиду азота (NO_2), принимающие диапазон значений от 2,08 долей ПДК (по гигиеническим нормативам) до 20,8 долей ПДК (по экологическим нормативам).

Исследование, проводимое П. Б. Рябухиным [4], помогло доработать методику определения количественной характеристики выбросов продуктов сгорания топлива во время лесозаготовки. Для этого при расчетах учитывалась не только специфика разнообразных технологий лесозаготовки, но также и различные системы машин:

1) валочно-пакетирующая машина (ВПМ) DD-850 + трелевочная машина (ТМ) DD-460 + сучкорезная машина (СМ) ЛП-33А;

2) (ВПМ) DD-850 с формировочно-транспортным модулем (ФТМ) + (ТМ) ТТ-4М + МСГ-3 + погрузчик ЛТ-188;

3) харвестер DD-1270D + (ТМ) форвадер (Ф) DD-1010D + погрузчик «Варата»;

4) (ВПМ) DD-850 + процессор РС-200 + погрузчик «Варата» + (ТМ) Ф DD-1010D.

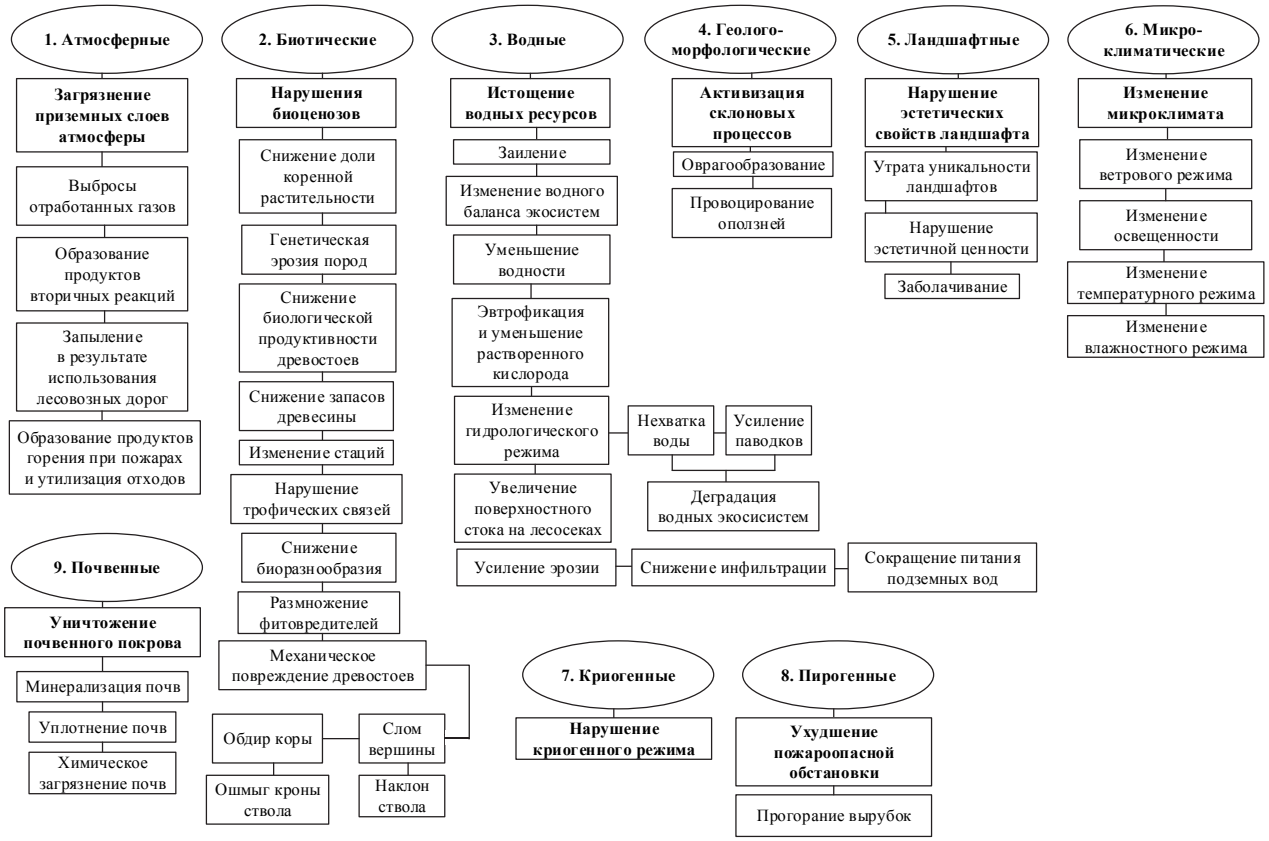


Рис. 1. Пути воздействия лесных машин на окружающую среду [2]

Такой подход к оценке позволил сделать вывод о том, что учет технических особенностей систем машин при количественной оценке загрязнения атмосферного воздуха играет ключевую роль для комплексной оценки эффективности использования различной лесозаготовительной техники. Так, в рамках измерений было выявлено, что минимальный ущерб от загрязнения атмосферного воздуха приносит хлыстовая технология «2», реализуемая системой машин (ВПМ) DD-850 с ФТМ + (ТМ) ТТ-4М [4].

Объем подобных исследований для лесных экосистем в настоящее время незначителен и не может сформировать целостное представление о степени экологической нагрузки. Считаем, что дальнейшие исследования в этой области смогли бы обеспечить надежную теоретическую, расчетно-математическую и экспериментальную базу для планирования освоения лесосек с наименьшим ущербом в виде загрязнения лесной экосистемы.

Вторая группа формируется факторами, которые затрагивают изменения в водных показателях экосистем при эксплуатации лесной техники. Антропогенная нагрузка при изъятии древесных ресурсов из лесной экосистемы влияет на различные гидрологические характеристики водоемов, находящихся в непосредственной близости к местам освоения лесосеки. К ним можно отнести водопроницаемость почвы и различные микробиологические показатели: EPT Index, Trent Biotic Index, олигохетный индекс Пареле D_1. Эти характеристики являются одними из важнейших и дают возможность качественно оценить уровень воздействия лесозаготовительных машин на водную экосистему, так как их изменение несет в себе комплексный характер и воздействует на подавляющее большинство представителей флоры и фауны леса.

В рамках исследования [5] была предпринята попытка оценить воздействие сплошных концентрированных вырубок бассейна реки Мезень в период с 1970 по 2000 гг. на состояние водных экосистем и их гидрологические характеристики. Натурные исследования включали визуальную оценку состояния рек Кужим и Нижняя Пузла с процентным соотношением вырубок в бассейне 53 и 10% соответственно. Для количественной оценки загрязненности водоемов в зависимости от численности донных сообществ (бентоса и олигохет) был выбран индекс Пареле D_1.

По результатам комплекса исследований удалось установить, что показатели индексов, оценивающих качество воды в бассейнах с меньшей площадью сплошных вырубок (не более 10%),

распределяются в пределах водоема равномерно и указывают на общее благополучное состояние воды в них. На площадях с увеличивающимися процентными показателями вырубок эти же характеристики также свидетельствуют о благополучном состоянии водоемов, но имеют характер нестабильного распределения [5].

Исследование [6] посвящено оценке комплексного влияния движителей лесозаготовительных машин на водно-фильтрационные характеристики лесной почвы в зависимости от ее уплотнения. Для проведения такого исследования были взяты 6 образцов почв с лесосеки, расположенной в квартале № 95 Морозовского лесничества (Всеволжский район Ленинградской области). Для определения коэффициента фильтрации почвы использовали прибор СоюзДорНИИ. Математические расчеты коэффициента фильтрации ($K_ф$, м/сут) производились с учетом поправки на температуру с приведением ее к 10°С по формуле Хазена [6].

Результаты исследований позволили сделать следующие выводы. Во-первых, степень уплотнения почвы напрямую влияет на ее фильтрационные характеристики. Во-вторых, при увеличении плотности почвы коэффициент фильтрации уменьшается в десятки и сотни раз. В-третьих, применяя методику получения результатов, описанную в исследовании [6], возможно прогнозировать несущую способность почвогрунтов на определенной территории лесосеки и выбирать наиболее рациональный план освоения лесосеки с точки зрения природопользования и экономических затрат.

Третья группа факторов влияет на непосредственное состояние почв. Лесная почва представляет собой сложную многоуровневую систему, которая состоит из органических и минеральных слоев. Конечная характеристика лесных почвогрунтов, представляющая интерес для планирования применения лесозаготовительных машин, – это несущая способность. Предельная несущая способность почвогрунта определяется допустимым удельным давлением движителей лесных машин, при котором пластичные деформации почвогрунта сменяются его разрушением [7]. При воздействии лесозаготовительных машин почва значительно уплотняется, что приводит к изменениям объема пор и воздушно-водного режима, что значительно ухудшает физиологическое функционирование корневой системы растений [8].

Исследование [9] проводилось с целью предложить технические и организационные меры, направленные на уменьшение вредного воздействия лесных тракторов и лесосечных машин на почву и насаждения. В рамках данной работы были выделены основные последствия воздействия машин на почвогрунты (рис. 2) [9].

Рис. 2. Последствия воздействий машинно-тракторных агрегатов на лесную среду [9]

Для уменьшения воздействия движителей лесных машин с целью предотвратить полностью или уменьшить вероятность генерации представленных выше последствий в данной работе были предложены технические и организационные мероприятия. Снижение уплотняющего воздействия движителей достигается за счет уменьшения удельного давления в зоне контакта колес и траков с почвой. К таким мероприятиям можно отнести [10]:

1) применение широкопрофильных шин (600–700 мм) сверхнизкого давления (15–20 кПа);

2) установку колес одинакового размера попарно по схеме «Тандем» с приводом на каждое из них;

3) применение быстросъемных эластичных гусеничных лент на колесных машинах;

4) применение активного привода всех колес по схемам 4к4, 6к6 и 8к8;

5) обеспечение оптимального отношения расстояния между осями вращения соседних катков к шагу гусеницы $l_k/t \le 1{,}7$;

6) установку опорных катков в большем количестве в два ряда в шахматном порядке;

7) применение пневмометаллических гусениц;

8) разработку новых моделей комбинированных агрегатов машин и рабочих органов.

Метод «4» позволяет увеличить силу тяги трактора до 40%, что даст возможность конструировать тракторы меньшей массы [9].

Применяя метод «3», можно добиться снижения удельного давления в кратное число раз. Например, удельное давление колесного харвестера «Локомо-999» и форвадера «Вальмет-866К» составляет 149 и 118 кПа соответственно. Установка гусеничных лент на каждую пару колес тандемной тележки позволяет снизить удельное давление в 4,1 и 3,8 раза соответственно, т. е. до 36 и 31 кПа [9].

Метод «8» позволяет значительно снизить значение уплотнения почвы путем сокращения количества необходимых для выполнения технологического процесса машин и соответственно количества проходов, совершенных ими [9].

Обратимся также к результатам исследований, которые были приведены в работе [10], с целью оценить изменения целостности почвенно-растительного покрова.

Основные нарушения целостности почвенного покрова происходят в результате транспортной трелевки. Для количественной оценки такого нарушения в рамках научного исследования [10] принимаются различия в показателях уплотнения верхних горизонтов почв в зависимости от количества проходов лесной транспортной техники.

Для отображения результатов исследования приведем таблицу, в которой отражены изменение плотности почвы для различного количества проходов трактора с возом и указаны различные категории поранения почвы (табл. 1) [10].

Таблица 1

Изменение плотности почвы в зависимости от количества проходов [10]

Категория поранения почвы при трелевке	Глубина, см	Изменение плотности почвы (г/см^3) в зависимости от количества проходов трактора с возом		
		5	10	15
I – неповрежденная почва	0–5	0,56	0,55	0,64
	5–10	0,84	0,92	0,84
	10–20	0,96	1,02	0,86
II – волок, закрытый порубочными остатками	0–5	0,64	0,62	0,9
	5–10	0,98	1,06	1,06
	10–20	1,15	1,15	1,2
III – минерализованный волок	0–5	0,88	0,7	1,06
	5–10	1,15	1,07	1,23
	10–20	1,21	1,15	1,24
IV – колея волока	0–5	0,82	0,62	1,1
	5–10	1,28	1,05	1,37

Анализ этих данных и других статистических показателей лесосек, располагающихся на территории Российской Федерации, позволил сформировать следующие результаты воздействия комплекса лесосечных и лесотранспортных машин на почвенные показатели [10]:

1) особо сильные изменения плотности почвы были отмечены в колее волока. Такие изменения влекут за собой значительное снижение водопроницаемости почвы и развитие горизонтально-линейной эрозии почвенно-растительного покрова;

2) бесчокерная трелевка деревьев за комли вызывает сильные изменения микрорельефа поверхности почвенно-растительного покрова на территории лесосеки. Также в месте выполнения лесной машиной комплекса движений «разворот» образуются микроповышения, которые в результате окончания лесосечных работ занимают в среднем 25% площади лесосеки;

3) трелевка деревьев приводит к увеличению минерализации почвы, сдирая лесную подстилку и перемешивая ее с минеральными горизонтами почвенно-растительного покрова. По итогу площадь сильноминерализованной поверхности лесосеки может достигать около 60%;

4) увеличение плотности почвы приводит к изменению и снижению пористости, что отрицательно влияет на развитие мелких корней деревьев (10 мм и меньше), количество которых составляет 93% от всей корневой системы;

5) увеличение объемов лесозаготовки приводит к переуплотнению почв не только в верхних слоях, но и на глубине 40–50 см.

Результатом выявленных последствий является снижение продуктивности растений и деревьев, корневая система которых вынуждена формироваться на глубине почвообрабатывающего слоя (25–30 см) с нестабильными показателями содержания влаги.

В рамках исследования [10] установлено, что плотность почвы может быть использована как наиболее общий показатель физического состояния почвы и ее плодородия. Для оценки последствий уплотнения почвы главным образом следует учитывать максимальное контактное давление движителей лесных машин, высокие показатели которого деформируют структуру почвы и ее показатели пористости, которая не восстанавливается различными методами рыхления и обработки.

Одновременно с изменением почвенных показателей (величина уплотнения, интенсивность колееобразования и уровень механических повреждений поверхностных корневых систем) происходят изменения биотических показателей леса, выраженных в приживаемости и продуктивности растений.

Изучение зависимостей этих показателей отраженно в статье [11]. В рамках этой работы представлены показатели плотности различных типов почв, при которых достигаются наилучшие эффекты приживаемости и продуктивности растений (табл. 2) [11].

Таблица 2

Оптимальные показатели плотности почвы для наилучшего эффекта приживаемости [11]

Почва	Плотность, г/см^3	
	естественного заложения	оптимальная для растений
1. Дерново-подзолистая: песчаная	1,5–1,6	1,4–1,5
супесчаная	1,3–1,4	1,10–1,45
суглинистая	1,35–1,50	1,0–1,2
2. Дерново-карбонатная суглинистая	1,4–1,5	1,0–1,2
3. Серая лесная тяжелосуглинистая	1,4	1,0–1,2
4. Болотная (степень разложения торфа 35–40%)	0,17–0,18	0,23–0,35

Анализируя методы взаимодействия движителей лесных машин (как гусеничных, так и колесных) с почвой лесосеки, можно выделить следующие последствия от применения лесной техники [11]:

1) давление лесной машины на почву сверх установленных значений в 80 кПа уплотняет ее верхние слои, что приводит к структурным изменениям почвенно-растительного покрова, влекущим за собой нарушение функционирования работы корневых систем растений и изменение воздушно-водного режима почвы [10, 11];

2) пространственная конфигурация (пористость) лесной почвы при давлении выше 80 кПа изменяется в очень сильной степени и зависит от деформаций уплотнения, деформаций сдвигов и количества проходов лесной машины, образующей колею;

3) количество погибших деревьев и растений зависит от глубины колеи, которая изменяется при различных показателях влажности и пористости почвы.

Выделив некоторые методы воздействия лесных машин на почву как на основной компонент экосистемы леса, далее перейдем к освещению методов их оценки и прогнозированию уровня этих воздействий.

В работе [12] приводится математическая модель для оценки влияния параметров движителей гусеничных лесных машин на величину деформации почвогрунтов.

Использование предложенной в рамках работы [12] модели позволяет:

– оценить последствия антропогенного воздействия на почву при освоении лесосеки с учетом различных характеристик: свойств почвогрунтов, условий эксплуатации лесных машин, рельефа лесосеки, различных технологий работ и режимов движения машин;

– выбрать геометрические параметры гусеничных движителей лесных машин, которые обеспечат оптимальные значения предельно допустимых нагрузок на почву, с целью сохранения целостности почвенно-растительного покрова;

– повысить экономическую выгодность освоения лесосеки в долгосрочной перспективе, сохраняя биоэкологические и физические характеристики почв, оптимальные для дальнейшего роста и развития деревьев и растений.

Совместно с технологическими особенностями устройства и эксплуатации лесных машин степень негативного воздействия движителей на почвогрунт может изменяться как от конструктивных решений, так и от организационных. Связанно это в первую очередь с так называемым «человеческим фактором». Выбор технологий и методик освоения лесосеки с использованием определенных моделей лесной техники может различаться в зависимости от разнообразия их показателей и показателей почвы.

Создание технологий лесозаготовки, которые бы учитывали различные особенности использования каждой модели лесной машины в цепочке заготовки лесных ресурсов, и применение определенных схем работ машин позволит удерживать негативное воздействие на экосистемы леса в допустимых пределах, обеспечивая возможность дальнейшего возобновления ресурсов.

В качестве примера влияния организационных решений приведем результаты исследования [13]. В рамках этой работы изучалась зависимость между уровнем деформации грунта и количеством проходов лесной машины, число которых может меняться из-за ошибочных действий оператора. Для определения глубины колеи, как глубины остаточной деформации грунта, использовалась формула расчета определения полной остаточной деформации, к которой добавляют значение истирания материала [13–15].

Для определения влияния ошибочных действий оператора лесной машины на увеличение уровня глубины остаточных деформаций рассматривали два типа грунтов: супесь (количество глинистых частиц 11,5%) и глину (количество глинистых частиц 56%). Для определения количества циклов разгрузок и нагрузок приняли схему движения харвестера в двух режимах: безошибочная траектория (6 нагружений на почву), ошибочная траектория, при которой количество нагружений увеличивается до 10. На основе коэффициентов *a*, *b*, *c* были произведены расчеты, результаты которых приведены в табл. 3 [12, 14].

Таблица 3

Показатели глубины остаточной деформации для различного количества проходов

Грунт	Влажность	*a*	*b*	*c*	*d*
Супесь	Сухая	1,36	66,4	86,8	0,0008
	Влажная	3,6	61,9	221,9	0,007
Глина	Сухая	7	30,5	191,7	0,037
	Влажная	4,5	4,8	21,1	0,31

Окончание табл. 3

Грунт	Влажность	δ_6	δ_{10}	δ_6/δ_{10}
Супесь	Сухая	0,166	0,232	1,4
	Влажная	0,374	0,584	1,56
Глина	Сухая	1,97	2,637	1,34
	Влажная	4,406	6,174	1,4

Анализируя результаты проделанной работы, можно отметить, что даже одно ошибочное движение оператора может привести к различиям между уровнями остаточных деформаций почвы от 34 до 56%.

На основании данных исследований сделаны следующие выводы: во-первых, изучение уровня негативного воздействия лесных машин на экосистемы лесов должно охватывать вопросы, связанные не только с конструктивными особенностями их эксплуатации. Во-вторых, формирование профессионального опыта и надежности работы персонала операторов лесных машин позволяет снизить уровень воздействия только по одному показателю почвенной характеристики на целых 56%.

Очевидно, что оценивать величину антропогенного воздействия на лесные экосистемы следует исходя из принципа создания комплексных методик оценки и прогнозирования различных методов взаимодействия каждой технической, технологической, а также организационной особенности применения человеком лесной техники в условиях лесозаготовки в рамках их взаимодействия в комплексе сложных процессов саморегуляции леса.

Создание таких методик является приоритетным направлением в сфере обеспечения возобновляемости экономического и природно-экологического потенциала лесных ресурсов развитых стран, также в интересы государства должны входить вопросы законодательного регулирования и обеспечение строгого контроля выполнения требований, предусмотренных созданными методиками.

Биотические изменения экосистемы леса, связанные с применением лесных машин при лесозаготовке. В целом повреждение лесных сообществ связано с проникновением повреждений во все ярусы лесного фитоценоза и нарушает устоявшиеся межвидовые взаимодействия [16].

Также существенным фактором изменения межвидовых взаимодействий является проникновение в замкнутую экосистему отдельно взятого леса новых видов, которое оказывается возможным после значительного изменения структуры почвы при воздействии на нее различной техники. Это одновременно может приводить к изменению естественного гидрологического режима, что в результате влечет к морфологическому изменению древостоев, их ослаблению или даже распаду [16].

Самым рациональным способом анализа изменений лесных экосистем следует считать натурные наблюдения [16]. В данной работе приведен сравнительный анализ морфологического состава, подверженного влиянию лесных дорог, в период с 2000 по 2009 гг.

Геоботанические исследования проводились на контрольном трансекте, заложенном на удалении 250 м от лесной дороги. Местом проведения исследования был выбран Задонский лесхоз Липецкой области, таксационные характеристики рассматриваемого участка леса таковы: 5С5Б, средняя высота (20 м), средний диаметр сосны (22 см), возраст сосны (2000 г.) около 49 лет, березы около 32 лет, число стволов 521 экз./га$^{-1}$. Подлесок выражен в большей степени рябиной, высота которой достигает 450 см (500 экз./га$^{-1}$) [16].

Для проведения работы в 2000 г. были описаны 4 ряда (параллельных дорожному полотну) по 5 квадратов на расстоянии до контрольной трансекты 250 м в глубину лесного массива. Позже полученные данные сравнили с контрольными данными для 2009 г.

На основе проведенных исследований и сравнительных таблиц были установлены изменения большого количества почвенных показателей в придорожных зонах в сравнении с контролем в глубине леса (250 м лесной дороги) [16]:

1) под влиянием лесной дороги значительно понизилась кислотность верхних почвенных горизонтов, увеличилось содержание общих кальция и магния, некоторое повышение валового содержания хлора, кальция и калия отмечали и в сосновой хвое. Общее количество тяжелых металлов в почве, таких как свинец и цинк, в придорожной зоне было заметно выше и достигало превышений ПДК в 2–3 раза (при ПДК цинка с учетом фона 100 мг/кг и при ПДК свинца 20 мг/кг); эти отличия прослеживались на дистанции до 40 м и более от лесной дороги и расчетной лесосеки;

2) общая глубина техногенного воздействия на лес увеличилась на расстояние 50 м и более;

3) опушка, разрушенная вследствие разработки лесосеки, усилила проникновение под полог леса загрязняющих веществ, оказывая все большее влияние на фитоценоз и экотоп;

4) проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса от лесной дороги (95% в среднем) до контрольных областей (79% в среднем) увеличилось в некоторых участках до 100%, что связано с повышением освещенности после вырубки подлеска;

5) изменился видовой состав травяно-кустарничкового яруса, в котором к 2009 г. не обнаружилось 15 видов, зарегистрированных в 2000 г., но также были зарегистрированы 22 «новых» вида;

6) общее число отмеченных видов увеличилось с 66 до 73. Большинство «новых» видов относятся к сорно-луговой растительности, которые более устойчивы к загрязненности почвы продуктами сгорания топлива;

7) отметили проникновение в глубину леса светолюбивых видов напочвенного покрова, что, вероятно, можно соотнести с изменением структуры опушки, выполняющей сдерживающую роль в проникновении различных факторов воздействия антропогенного влияния дорог и магистралей;

8) наблюдается ослабление и частичная гибель древостоя в результате воздействия на него лесной дороги.

Основной метод достижения сохранности биотических взаимодействий между различными представителями флоры и фауны леса, которые обеспечивают биологически благополучные условия для возобновления экономического и рекреационного потенциала лесных массивов, заключается в специфическом выборе технологий заготовки, транспортировки и хранения древесины.

Выбор наиболее уместной технологии лесозаготовки может обеспечить удовлетворительный уровень естественного восстановления лесных ресурсов. Таким образом, определение особенностей и нахождение закономерностей в процессах естественного возобновления на вырубках представляет огромный практический потенциал, способный удовлетворить как экономические, так и природоохранные требования.

Для подтверждения этого приведем результаты сравнения влияния различных технологий лесозаготовки на динамику естественного лесовозобновления в условиях Манского лесхоза на вырубках горно-таежных лесов [17].

Методика данного исследования подразумевала следующие аспекты [17]:

1) объект исследования – вырубки смешанных сосновых насаждений 18-летней давности;

2) лесоразработка осуществлялась двумя технологиями: первая технология с использованием на трелевке полуподвесной канатной установки (бензопила «Урал» + СКУ МЛ-43 на базе трактора ТТ-4), вторая технология – традиционная (бензопила «Урал» + ТТ-4);

3) для изучения вопросов возобновления и динамики высоты в пределах одной вырубки в верхних, средних и нижних слоях были заложены пробные площади (2×100 м);

4) на каждой площади был произведен полный перечет древесных пород (живых, сомнительных и усохших);

5) также был произведен перечет подроста с замерами его высоты и определением его возраста, с разделением в дальнейшем на группы по возрасту, высоте, жизнеспособности и поколению (последующее (до 17 лет) и предварительное (после 18 лет)).

Качественное состояние подроста на объекте представлено высокой степенью жизнеспо-

собности. Все усохшие экземпляры относятся к последующему поколению. Всего учтено сомнительных: 620 и 134 шт. на 1 га (2,7 и 0,6% от общего возобновления) [17].

На основе натурных исследований и полученных результатов были сформулированы следующие выводы [17, 16]:

1) рассматривая динамику годичного прироста в высоту для одинаковых пород на различных объектах исследования, нужно отметить, что этот показатель подроста выше на вырубке с использованием технологии «бензопила – СКУ МЛ-43», чем на вырубке с технологией «бензопила + ТТ-4». Это можно объяснить различным уровнем уплотнения почвы от применения трелевочной техники;

2) было выявлено успешное, но различное возобновление подроста: под пологом насаждений (15,3 тыс. шт/га), на вырубках «бензопила + СКУ МЛ-43» (23,4 тыс. шт/га) и на вырубках «бензопила + ТТ-4» (17,9 тыс. шт/га);

3) также средний показатель высоты сохраненных во время рубки пород выше у технологии «бензопила + СКУ МЛ-43» (4,09 м) против 2,64 м у технологии «бензопила + ТТ-4»;

4) использование технологии «бензопила + СКУ МЛ-43» конкретно в данных условиях исследования позволит, с экономической точки зрения, обеспечить выращивание спелой древесины в самом быстром темпе, обеспечивая наиболее качественный оставленный подрост.

Заключение. Таким образом, в рамках данной статьи проведен анализ существующих научных исследований в области оценки антропогенного воздействия на экосистемы леса. Необходимо заметить, что приведенные в рамках данной работы исследования не являются полностью исчерпывающими. Разумеется, не представляется возможным осветить полный перечень работ, произведенных в области оценки антропогенного воздействия от применения лесных машин на различные экосистемы леса. Эта невозможность заключается в нескольких причинах:

1) развитие научно-технического прогресса, который привносит в конструкцию лесных машин принципиально новые механизмы, технические агрегаты, а также способы преобразования энергии;

2) техническая сложность устройства лесных машин, которая генерирует большое количество факторов антропогенного воздействия на окружающую среду лесосеки;

3) плотная взаимосвязь представителей различных экосистем леса, которая находится в процессе постоянного саморегулирования, поэтому воздействие даже на один такой фактор незамедлительно сказывается на других.

Для обеспечения надлежащего уровня экономической стабильности, конкурентоспособности, а также экономического роста лесной промышленности, обеспечивающей сохранение, а при возможности, приумножение биологического потенциала лесных ресурсов, необходима разработка новых методов оценки антропогенного воздействия. Эти методы должны отвечать следующим требованиям:

1) оперативное и своевременное создание планов освоения лесосеки с учетом требований сохранения биологического потенциала леса и извлечением максимально возможной экономической выгоды;

2) снижение экономических потерь от переизбытка автопарка лесных машин путем предварительного создания наиболее выгодных и безопасных технологий освоения лесосеки с применением конкретных марок и моделей лесных машин;

3) снижение долгосрочных экономических потерь в результате ненадлежащей работы лесовосстановительных и лесоохранных мероприятий.

Для обеспечения соответствия методов оценки антропогенного воздействия машин и технологий на лесные экосистемы перечисленным требованиям возможно создание единой методики оценки лесных машин, которая объединит большее количество факторов их воздействия на природный баланс лесосеки путем введения регулирующего показателя, характерного для всех этих факторов.

Обобщая факторы экологического воздействия лесопромышленных машин и технологий на лесные экосистемы, можно сформировать следующие их группы по типу влияния:

1) изъятие из лесных экосистем вещества (вырубка и вывоз леса, ликвидация на ряде участков лесной подстилки и части почвы, в том числе за счет последующего смыва);

2) внесение в природу чужеродных веществ и энергии (ядохимикаты при борьбе с болезнями и вредителями, топливо и продукты его сгорания при проведении лесосечных, лесотранспортных работ и т. д.);

3) преобразование и перераспределение вещества в природе (изменение лесных ландшафтов в результате рубок, расчистка захламленных насаждений и т. д.).

Продолжение исследований в данной области потенциально может привести к созданию единой системы проектирования, создания, а также регулирования использования лесных машин для обеспечения их наибольшей пригодности с точки зрения сохранения лесных ресурсов.

Список литературы

1. Машина // Большая советская энциклопедия: в 66 т. Т. 38. М.: Советская энциклопедия, 1938. 416 с.

2. Майорова Л. П., Рябухин П. Б. Воздействие лесозаготовок на окружающую среду // Вестник КрасГАУ. 2012. № 8. С. 73–77.

3. Майорова Л. П., Рябухин П. Б., Мелешко М. А. Оценка загрязнения атмосферного воздуха в процессе лесозаготовок // Вестник КрасГАУ. 2007. № 4. С. 86–91.

4. Рябухин П. Б. Экологические аспекты при эксплуатации лесозаготовительных машин // Леса России и хозяйство в них. 2016. № 3 (58). С. 68–71.

5. Боровлев А. Ю. Методика оценки долговременного воздействия лесозаготовок на водные ресурсы // Экология родного края: проблемы и пути решения: материалы Всеросс. науч.-практ. конф., г. Киров, 28–29 апр. 2016 г. Киров: Вятский государственный университет, 2016. С. 311–314.

6. Лисов В. Ю., Язов В. Н. Экспериментальное определение водопроницаемости лесной почвы в зависимости от ее плотности // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2014. № 5 (341). С. 89–96.

7. Невзоров А. Л. Инженерная геология и механика грунтов: учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Архангельск: ЛГТУ, 1998. 116 с.

8. Беккер М. Г. Введение в теорию систем «местность – машина». М.: Машиностроение, 1973. 520 с.

9. Бартнев И. М., Драпалюк М. В. Снижение вредного воздействия лесных тракторов и лесосечных машин на почву и насаждения // Лесотехнический журнал. 2012. № 1 (5). С. 61–66.

10. Влияние воздействия лесных машин на лесорастительные свойства почв / В. А. Ермичев [и др.] // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2005. № 12. С. 130–132.

11. Анализ взаимодействия гусеничных лесных машин с почвой / В. Н. Лобанов [и др.] // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2009. № 24. С. 37–39.

12. Прогнозирование последствий воздействия гусеничных лесных машин на почву / В. А. Ермичев [и др.] // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2004. № 8. С. 183–185.

13. Чекотин Р. С., Вербицкая Н. О. Воздействие лесозаготовительных машин на почвенный покров при ошибочных движениях // Вестник современных исследований. 2018. № 6.1 (21). С. 291–293

14. Иванов Н. Н., Охотин В. В. Дорожное почвоведение и механика грунтов. Л.: Огиз: Гострансиздат, Ленингр. отд., 1934. 387 с.

15. Бартенев И. М., Драпалюк М. В. Снижение вредного воздействия лесных тракторов и лесосечных машин на почву и насаждения // Лесотехнический журнал. 2012. № 1 (5). С. 61–66.

16. Кондрашова Е. В., Скрыпников А. В., Скворцова Т. В. Повреждение лесных экосистем в процессе лесозаготовки // География: история, современность, перспективы: сб. тр. 2012. С. 179–186.

17. Мельниченко В. М. Влияние технологий лесозаготовок на естественное возобновление на вырубках горно-таежных лесов в условиях Манского лесхоза // Вестник КрасГАУ. 2008. № 3. С. 154–158.

References

1. Machine. *Bol'shaya sovetskaya entsiklopediya* [Great Soviet encyclopedia]. Vol. 38. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 416 p. (In Russian).

2. Mayorova L. P., Ryabukhin P. B. Environmental impact of logging. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasGAU], 2012, no. 8, pp. 73–77 (In Russian).

3. Mayorova L. P., Ryabukhin P. B., Meleshko M. A. Assessment of air pollution during harvesting. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasGAU], 2007, no. 4, pp. 86–91 (In Russian).

4. Ryabukhin P. B. Environmental aspects in the operation of forestry machines. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of Russia and the economy in them], 2016, no. 3 (58), pp. 68–71 (In Russian).

5. Borovlyov A. Yu. Methodology for assessing the long-term impact of logging on water resources. *Ekologiya rodnogo kraya: problemy i puti resheniya: materialy Vseross. nauch.-prakt. konf.* [Ecology of the native land: problems and solutions: materials of All-Russian scientific-practical conference]. Kirov, 2016, pp. 311–314 (In Russian)

6. Lisov V. Yu., Yazov V. N. Experimental determination of water permeability of forest soil depending on its density. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal* [News of higher educational institutions. Forest magazine], 2014, no. 5 (341), pp. 89–96 (In Russian).

7. Nevzorov A. L. *Inzhenernaya geologiya i mekhanika gruntov* [Engineering geology and soil mechanics]. Arhangel'sk, LGTU Publ., 1998. 116 p. (In Russian).

8. Bekker M. G. *Vvedenie v teoriyu sistem "mestnost' – maschina"* [Introduction in the theory of systems "landscape – machine"]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1973. 520 p.

9. Bartnev I. M., Drapalyuk M. V. Reducing the harmful effects of forest tractors and felling machines on soil and plantations. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forestry magazine], 2012, no. 1 (5), pp. 61–66 (In Russian).

10. Yermichev V. A., Lobanov V. N., Krivchenkova G. N., Artemov A. V. Influence of the impact of forest machines on the forest-growing properties of soils. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2005, no. 12, pp. 130–132 (In Russian).

11. Lobanov V. N., Krivchenkova G. N., Nesterov D. Yu., Chesnov M. A. Analysis of the interaction of tracked forest machines with soil. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2009, no. 24, pp. 37–39 (In Russian).

12. Yermichev V. A., Lobanov V. N., Goremykin A. S., Krivchenkova G. N. Predicting the effects of tracked forest machines on soil. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2004, no. 8, pp. 183–185 (In Russian).

13. Chekotin R. S., Verbitskaya N. O. Impact of forestry machines on soil cover during erroneous movements. *Vestnik sovremennykh issledovaniy* [Bulletin of modern research], 2018, no. 6.1 (21), pp. 291–293 (In Russian).

14. Ivanov N. N., Okhotin V. V. *Dorozhnoe pochvovedenie i mekhanika gruntov* [Road soil science and soil mechanics]. Leningrad, Ogiz, Gostransizdat Publ., 1934. 387 p.

15. Bartenev I. M., Drapalyuk M. V. Reducing the harmful effects of forest tractors and felling machines on soil and plantations. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forestry magazine], 2012, no. 1 (5), pp. 61–66 (In Russian).

16. Kondrashova E. V., Skrypnikov A. V., Skvortsova T. V. Damage to forest ecosystems during harvesting. *Geografiya: istoriya, sovremennost', perspektivy* [Geography: history, modernity, prospects], 2012, pp. 179–186 (In Russian).

17. Mel'nichenko V. M. The influence of logging technologies on natural regeneration at deforestation of mountain taiga forests under the conditions of Mansky forestry. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasGAU], 2008, no. 3, pp. 154–158 (In Russian).

Информация об авторах

Столбин Виталий Сергеевич – магистрант кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: karas-logos@mail.ru

Голякевич Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: gsa@belstu.by

Information about the authors

Stolbin Vitaly Sergeyevich – Master's degree student, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: karas-logos@mail.ru

Golyakevich Sergey Aleksandrovich – PhD (Engineering), Associated Professor, Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gsa@belstu.by

Поступила 10.03.2020

УДК 630*36:621.9

С. А. Голякевич, Р. А. Карсюк
Белорусский государственный технологический университет

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ В ПРОЦЕССЕ ВАЛКИ ДЕРЕВА ХАРВЕСТЕРОМ

В статье рассмотрены перспективы применения систем рекуперации в многооперационных лесозаготовительных машинах. Указано, что наиболее перспективной операцией для рекуперативного восстановления энергии является операция валки дерева. Проведено математическое моделирование процесса падения дерева с учетом сопротивления движению со стороны воздушной среды и рекуперативного момента. Установлено, что кинетическая энергия дерева в конце падения для сосны с таксационным диаметром 32 см может превышать 100 кДж. Замечено, что раннее включение процесса рекуперации приводит к значительному замедлению процесса валки (более чем в 2 раза) и низкому процентному показателю рекуперируемой энергии (не более 15%). Выявлено, что увеличение рекуперативного момента непропорционально замедляет падение дерева и может вызвать его полную остановку.

Предложена и теоретически подтверждена гипотеза о том, что более позднее включение процесса рекуперации позволяет сохранить в допустимом диапазоне время валки дерева (до 6,5 с) и увеличить величину рекуперируемой энергии от общей кинетической энергии до 98%. В этом случае начало процесса рекуперации соответствует углу поворота харвестерной головки относительно вертикальной оси, равному 45°.

В качестве побочного положительного эффекта процесса рекуперативного торможения дерева выявлено значительное уменьшение энергии удара дерева при его контакте с поверхностью земли. В заключении статьи приводятся рекомендации по дальнейшему исследованию процессов рекуперативного торможения на операциях технологического цикла лесозаготовительных машин. Для дальнейшего анализа предложены операции торможения ствола дерева при обрезке сучьев, торможения рабочих органов, в частности манипуляторов и др.

Ключевые слова: харвестер, дерево, падение, модель, дифференцирование, рекуперация, энергия, сопротивление воздуха, производительность, торможение.

S. A. Golyakevich, R. A. Karsyuk
Belarusian State Technological University

ASSESSMENT OF THE POTENTIAL ENERGY RECOVERY IN FELLING A TREE HARVESTER

The article discusses the prospects of using recovery systems in multioperational forestry machines. It is indicated that the most promising operation for regenerative energy recovery is a tree felling operation. Mathematical modeling of the process of falling a tree was carried out taking into account the resistance to movement from the air and the regenerative moment. It was established that the kinetic energy of a tree at the end of a fall for pine with a taxation diameter of 32 cm can exceed 100 kJ. It is noted that the early inclusion of the recovery process leads to a significant slowdown in the felling process (more than 2 times) and a low percentage of recuperated energy (not more than 15%). It was revealed that an increase in the regenerative moment disproportionately slows down the fall of a tree and can cause it to stop completely.

A hypothesis was proposed and theoretically confirmed that the later inclusion of the recovery process allows you to save the tree felling time (up to 6.5 s) in the acceptable range and increase the amount of recuperated energy from the total kinetic energy to 98%. In this case, the beginning of the recovery process corresponds to a rotation angle of the harvester head relative to the vertical axis equal to 45°.

As a side positive effect of the regenerative braking process of the tree, a significant decrease in the energy of impact of a tree upon its contact with the surface of the earth was revealed. The article concludes with recommendations for further study of regenerative braking processes in operations of the technological cycle of forestry machines. For further analysis, we proposed the operations of braking a tree trunk when cutting branches, braking of working bodies, in particular manipulators, etc.

Keywords: harvester, tree, fall, model, differentiation, recovery, energy, air resistance, productivity, braking.

Введение. Одним из способов повышения энергетической эффективности мобильных машин является создание систем и механизмов, способных восстанавливать энергию, затраченную на совершение работы. Данный процесс принято именовать рекуперацией. Исследованию возможностей рекуперации энергии движения машин различного назначения уделяется пристальное внимание ученых во многих отраслях промышленности [1–7]. На сегодняшний день механизмы рекуперации внедрены в легковые и грузовые электромобили, автомобили с гибридными силовыми установками и электропоезда. Принципы рекуперации, используемые в данных машинах, разнообразны, однако эффективность многих из них часто подвергается критике. Особенно скептически ученые относятся к эффективности рекуперации в легких электромобилях. Считается [8, 9], что малость тормозного пути в общем времени цикла движения машины не позволяет эффективно заряжать аккумуляторы, а величина рекуперируемой энергии не превышает 1% от общего объема ее потребления, что не оправдывает затрат на оборудование машин такими системами.

Несмотря на широкое применение идеи рекуперации энергии в других отраслях, в специализированных лесных машинах она не получила достаточного распространения на современном этапе. Преимущественно это связано с недостаточным объемом исследований в области рекуперативных возможностей на лесопромышленных операциях. В настоящее время в странах европейского союза в рамках программы Horizon 2020 реализуется два обширных проекта (Tech4effect и Forwarder 2020) с общим объемом финансирования свыше 1 млн евро, которые направлены на создание новых образцов мобильных лесных машин и повышение эффективности их работы. Зарубежные ученые считают, что наибольшим потенциалом повышения энергоэффективности обладают системы рекуперативного торможения [10–13]. К примеру, одной из целей программы Forwarder 2020 является снижение на 30% потребления топлива форвардером на погрузочно-разгрузочных операциях за счет рекуперативного торможения при использовании манипулятора [14].

Ранее проведенные авторами исследования проблем технологической организации лесозаготовительного производства и эффективной эксплуатации лесных машин позволили сделать вывод о том, что помимо энергии непосредственного движения лесной машины эффективно рекуперироваться может и энергия других операций, присутствующих только в лесозаготовительном производстве. Потенциально возможными источниками энергии в этом случае являются: падение дерева при валке, торможение ствола дерева при обрезке сучьев, торможение рабочих органов, в частности манипуляторов на погрузочно-разгрузочных операциях, и др.

Целью настоящей статьи является разработка методологической основы для проведения предварительного энергетического анализа операции валки дерева харвестером и получение данных о возможной продолжительности рекуперации и величине вырабатываемой энергии.

В качестве базовой машины, совершающей операцию валки дерева, принят харвестер Амкодор 2551, как наиболее часто используемый на рубках главного пользования в нашей стране.

Основная часть. Для оценки потенциала рекуперации разработана математическая модель падения дерева с учетом работы рекуперативного механизма. В качестве допущений принято, что ствол дерева представляет собой недеформируемое жесткое тело, сопротивление воздушной среды действует на крону дерева как сила, сосредоточенная в центре давления кроны и направленная перпендикулярно продольной оси ствола. Общая упрощенная схема математической модели падения дерева приведена на рис. 1.

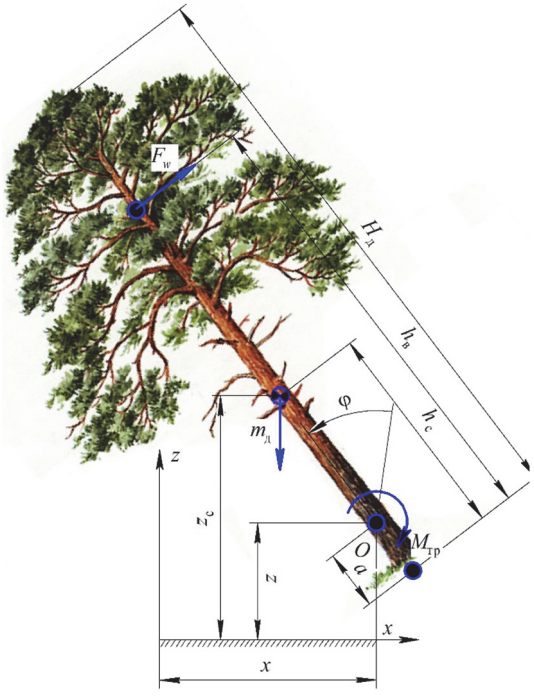


Рис. 1. Расчетная схема падения дерева при валке харвестером

В качестве параметров типичных деревьев приняты усредненные высоты сосны I разряда в зависимости от значений диаметра ствола на высоте 1,3 м ($d_{1,3}$) (таблица).

Значения коэффициентов функции сопротивления воздушной среды для различных таксационных параметров деревьев сосны

$d_{1,3}$, м	$H_д$, м	C_w	q_s	q_v
0,18	20,0	5,76	2,01	1,21
0,20	22,0	5,67	2,09	1,27
0,22	23,0	5,57	2,155	1,32
0,24	24,0	5,47	2,22	1,37
0,26	25,0	5,45	2,245	1,385
0,28	26,0	5,43	2,27	1,4
0,30	27,0	5,335	2,305	1,415
0,32	28,0	5,24	2,34	1,43
0,34	29,0	4,71	2,44	1,48
0,36	30,0	4,18	2,54	1,53

Для определения иных характеристик дерева, требуемых для моделирования его падения, использована методика, ранее изложенная в [15].

Диаметр дерева в плоскости срезания (м) определялся по соотношению

$$d_0 = q_0 d_{1,3},$$

где q_0 – коэффициент, учитывающий увеличение диаметра дерева в области спиливания (среднее значение коэффициента q_0 для сосны равно 1,25).

Длина ствола ($H_с$) меньше высоты дерева ($H_д$) на величину отрубаемой вершинной части (принята равной 2,5 м).

Масса (кг) надземной части дерева сосны включает массу ствола, сучьев и хвои. Масса ствола рассчитывалась по зависимости

$$m_с = V_с \rho_с,$$

где $\rho_с$ – средневзвешенное значение плотности стволовой древесины сосны (820 кг/м^3).

Для анализа энергетических характеристик падения дерева в первом приближении можно рассматривать его ствол как усеченный конус с соответствующим коэффициентом формы и видовым числом.

Высота центра тяжести ствола $h_с$ (м) составляет $0,35H_д$.

Коэффициент формы ствола (q) для деревьев, чей центр тяжести находится на высоте $0,35H_д$, составляет 0,67.

Для определения объема ствола (хлыста) (м^3) использована приближенная формула:

$$V_с = \frac{\pi}{8}\left(d_п^2 + d_в^2\right) H_с,$$

где $d_в$ – диаметр хлыста в верхнем отрубе (0,06 м).

Высота дерева определена по таксационным таблицам [16] и приведена в таблице.

Масса кроны $m_к$ в зависимости от массы дерева для сосны принята равной 15%.

Момент инерции дерева относительно оси его поворота при валке:

$$I_0 = 0,185 m_c h_c^2.$$

Сила сопротивления падению дерева со стороны воздушной среды может быть приближенно определена по выражению

$$F_w = C_w \frac{m q_v}{2 q_s} \dot{\varphi}^m \left(d_0 H_д q_s\right)^m,$$

где d_0 – диаметр дерева в плоскости среза, м; m – показатель степени скорости в законе сопротивления воздушной среды; C_w, q_w и q_s – расчетные коэффициенты (таблица).

Величина показателя m для деревьев с кроной составляет:

$$m = 2,03 - 0,65 l_к / H_д,$$

где $l_к$ – протяженность кроны дерева, м, для расчетов принята величина $l_к = 1/5 H_д$.

Высота положения центра давления (м) воздушной среды на дерево сосны составляет $h_в = 0,8 H_д$.

Кинетическая энергия дерева в каждый момент времени находится по известной зависимости:

$$T_д = \frac{I_0 \dot{\varphi}^2}{2}.$$

Дифференциальное уравнение движения дерева под действием названых сил имеет вид:

$$\ddot{\varphi} = \begin{cases} \dfrac{-C_w \dfrac{m q_v}{2 q_s} \dot{\varphi}^m \left(d_0 H_д q_s\right)^m \varphi + m_д g h_с \sin(\varphi) - M_{рек}}{0,185 m_д h_c^2}, \\ \text{если } 0 < \varphi \le \dfrac{\pi}{2}; \\ 0, \text{если } \dfrac{\pi}{2} < \varphi. \end{cases}$$

Моделирование падения дерева в поле сил тяжести при действии силы сопротивления воздушной среды и момента рекуперативного устройства проводилось в программном пакете MathCad 14. В качестве начальных условий принято отклонение продольной оси дерева от вертикали на угол $\varphi = 0,1°$ и отсутствие начальной угловой скорости его движения.

Организация процесса рекуперации на операции валки дерева возможна на основе использования механизмов вращательного или поступательного действия. В случае рекуперации в электрическую энергию – это генераторы,

а для гидравлической энергии можно использовать существующие гидроцилиндры подъема-опускания харвестерной головки с переводом их работы при сжатии в контур гидравлического рекуператора. При этом для процесса рекуперации важна не только конечная величина вырабатываемой энергии, но и потенциально возможная продолжительность ее накопления.

Поскольку рекуперативный момент $M_{рек}$ является моментом сопротивления падению дерева, то чрезмерное повышение его величин и раннее возникновение может привести к полной остановке процесса валки. Это должно учитываться при разработке подобных систем. В данной связи анализ процесса валки дерева с рекуперированием его кинетической энергии проведен для моментов начала рекуперации, соответствующих углам поворота $\varphi_{н.рек} = \pi/32$ (рис. 2), $\pi/16$, $\pi/8$ и $\pi/4$.

Сравнительная характеристика процессов падения дерева с различными моментами рекуперации (3,5–7,5 кН·м) показывает (рис. 2, *а*), что при начале процесса рекуперации, соответствующем углу поворота харвестерной головки $\varphi_{н.рек} = \pi/32$, максимально возможная величина рекуперируемой энергии составляет не более $E_{рек} = 9{,}1$ кДж.

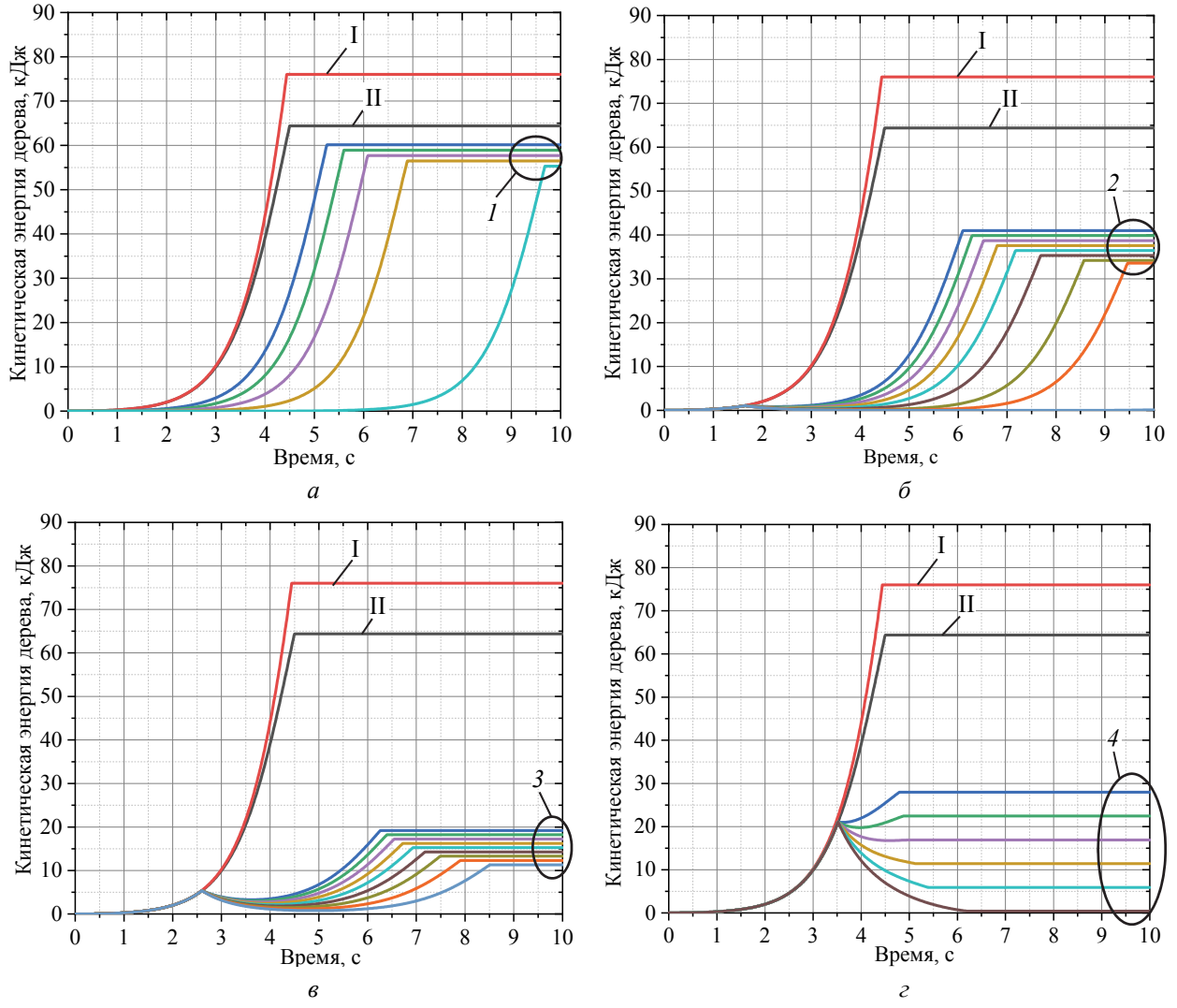


Рис. 2. Рекуперативный потенциал $E_{рек}$ энергии падения дерева
для различных углов начала рекуперации $\varphi_{н.рек}$:
а – $\varphi_{н.рек} = \pi/32$; *б* – $\varphi_{н.рек} = \pi/16$; *в* – $\varphi_{н.рек} = \pi/8$; *г* – $\varphi_{н.рек} = \pi/4$,
и различных моментов рекуперации $M_{рек}$, равных:
1 – 3,5–7,5 кН·м (с шагом 1 кН·м); *2* – 20,5–27,3 кН·м (с шагом 1 кН·м);
3 – 45,5–53,5 кН·м (с шагом 1 кН·м); *4* – 52,5–92,5 кН (с шагом 8 кН·м);
I – кинетическая энергия падения дерева без учета сил сопротивления воздушной среды;
II – кинетическая энергия падения дерева с учетом сил сопротивления воздушной среды

В этом случае момент рекуперации достигает величины 7,5 кН·м, а продолжительность падения дерева увеличивается с 4,5 до 9,7 с. Такое увеличение времени выполнения операции валки не приемлемо для интенсивной и производительной работы харвестера. При $M_{рек} = 7{,}5$ кН·м величина рекуперируемой энергии составляет около 15% кинетической энергии дерева, а большее увеличение $M_{рек}$ приводит к прекращению процесса падения дерева.

В процессе моделирования установлено, что прирост продолжительности падения дерева не пропорционален приросту рекуперированной энергии. Так, при $M_{рек} = 6{,}5$ кН·м рекуперируется до $E_{рек} = 7{,}88$ кДж энергии при продолжительности валки $t_в = 6{,}9$ с, а при $M_{рек} = 5500$ Н·м – $E_{рек} = 6{,}67$ кДж и $t_в = 6{,}1$ с.

Поскольку в начальный момент времени дерево не обладает достаточной кинетической энергией, даже относительно небольшой момент рекуперации действует как стабилизирующий и препятствует падению дерева. Поэтому была сформирована гипотеза, что более позднее начало процесса рекуперации может позволить рекуперировать больше энергии, при этом незначительно увеличивая время падения дерева. Действительно, при $\varphi_{н.рек} = \pi/16$ (рис. 2, *б*) возможно существенно увеличить реализуемый момент $M_{рек}$ до 27 кН·м без остановки падения дерева и соответственно увеличить энергию $E_{рек}$ до 30,77 кДж. При $M_{рек} = 20{,}5$ кН·м энергия $E_{рек}$ составляет 23,38 кДж, а $t_в = 6{,}1$ с, т. е. смещение начала рекуперации всего с 17,7 до 35,4° позволяет увеличить величину рекуперируемой энергии более чем в 3 раза при сопоставимой продолжительности процесса валки.

Смещение начала процесса рекуперации в $\varphi_{н.рек} = \pi/8$ (рис. 2, *в*) позволяет реализовывать рекуперативные моменты вплоть до $M_{рек} = 53{,}5$ кН·м и рекуперировать до 82,5% энергии падения дерева.

Характерным является процесс с $\varphi_{н.рек} = \pi/4$ (рис. 2, *г*). К моменту начала рекуперации дерево обладает начальной кинетической энергией в 21 кДж. Позднее начало рекуперации позволяет восстановить до 98% потенциальной энергии дерева (около 64 кДж) при продолжительности валки не более 6,2 с. Особенностью данного процесса является постепенное уменьшение энергии падения дерева от момента начала рекуперации. К моменту касания дерева горизонтальной поверхности земли его кинетическая энергия составляет всего 413 Дж. Поэтому косвенным положительным эффектом процесса рекуперации следует считать возможность плавного демпфирования падения дерева, что позволяет снизить нагрузки, действующие на рабочие органы харвестера.

Замедленное движение дерева на участке от начала рекуперации до контакта с поверхностью также приводит к более низкой силе сопротивления воздушной среды, так как она пропорциональна скорости движения. Это позволяет дополнительно рекуперировать до 10 кДж энергии за счет уменьшения ее рассеивания силами сопротивления воздушной среды.

Стоит отметить, что для достижения такой эффективности торможения требуется реализация весьма значительных рекуперативных моментов. Вопросы создания механизмов, способных их обеспечить, должны быть изучены дополнительно, как это сделано для устройств рекуперации в иных областях [17]. При этом достигаемый эффект должен быть проанализирован в полном цикле работы машины [18, 19], с учетом работы иных систем, повышающих эффективность харвестера [20]. Сама же рекуперируемая энергия может быть накоплена в пневмогидравлическом аккумуляторе мембранного типа. Их производство налажено ведущими мировыми производителями в данной области (Bosch, Parker, EST, Eaton, Hydac). Данные гидравлические аккумуляторы имеют рабочее давление до 40 МПа, обеспечивают высокую «плотность» накопленной энергии (до 195 кДж/л) и производятся с объемом до 50 л, что способно полностью обеспечить потребности в накоплении рекуперируемой энергии. Масса таких гидравлических аккумуляторов варьируется в широком диапазоне: от 45 кг для 9-литрового баллона до 167 кг для 48-литрового.

Заключение. Таким образом, в статье даны теоретические предпосылки к практической реализации процесса рекуперации энергии падения дерева. В эксплуатационных условиях Республики Беларусь при обработке каждого дерева может рекуперироваться до 64 кДж энергии. Область ее последующего использования в приводах харвестеров достаточно широка. Среди наиболее перспективных – компенсация запаздывания процесса регулирования гидронасосов во время начала работы нескольких объемных гидравлических потребителей; привод малообъемных потребителей (пильные механизмы, ротаторы, поворотные устройства манипуляторов и т. д.), питание дополнительного оборудования (освещение, кондиционирование и т. п.) после преобразования в электрическую энергию. Вывод об эффективности такого процесса с использованием штатной гидравлической системы, оборудованной гидроаккумуляторами, можно сделать только после детального анализа энергетического баланса харвестера на всех операциях и потенциала реализации его энергетических характеристик в разных условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Kim Y. J., Filipi Z. Simulation study of a series hydraulic hybrid propulsion system for a light truck // SAE Technical Paper 2007-01-4151. Allegeini: Evoqua Water Technologies LLC, 2007. 17 p.

2. Боднарь И. В., Евграфов С. В., Князев И. М. Возможности рекуперации энергии в транспортно-технологических машинах // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, новации: материалы Междунар. науч.-техн. конф., г. Омск, 7–9 дек. 2016 г. Омск: СибАДИ, 2016. С. 497–502.

3. Набокин А. В., Посметьев В. И., Никонов В. О. Повышение эффективности автомобилей за счет рекуперации энергии их агрегатов и систем // Воронежский научно-технический вестник. 2019. Т. 4, № 4 (18). С. 11–19.

4. Никонов В. О., Посметьев В. И., Латышева М. А. Состояние проблемы и обзор конструкций транспортных средств с системами рекуперации энергии торможения // Воронежский научно-технический вестник. 2018. Т. 2, № 2 (24). С. 4–19.

5. Бажанов В. И., Сгадлев А. М. Анализ эффективности гидравлической системы рекуперации энергии торможения автомобиля // Символ науки. 2016. № 9-1 (21). С. 20–23.

6. Васьковский Ю. Н., Пода М. В. Моделирование электромеханических систем рекуперации энергии колебаний транспортных средств // Технічна електродинаміка. 2019. № 4. С. 33–41.

7. Посметьев В. И., Никонов В. О. Имитационное моделирование рекуперации гидравлической энергии в пневмогидравлическом седельно-сцепном устройстве лесовозного тягача с полуприцепом // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2019. Т. 7, № 3 (46). С. 213–220.

8. Yan Shuai, Sun Weichao. Energy regeneration scheme and self-powered criterion of motor-driven active suspension // 35th Chinese Control Conference, Chengdu China, 27–29 July, 2016. Chengdu China, 2016. P. 8926–8931.

9. Быкадоров А. Л., Заруцкая Т. А., Карбинов А. В. К вопросу о качестве избыточной энергии рекуперации // Совершенствование организации и управления перевозками в условиях реформ: межвуз. сб. науч. тр. Ростов, 2002. С. 212–215.

10. Никонов В. О., Посметьев В. И. Рекуперация гидравлической энергии стрелы гидоманипулятора лесовозного автомобиля // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6, № 4 (40). С. 177–183.

11. Geiger C., Geimer M. Efficiency optimisation of a forestry crane by implement hydraulics with energy recovery // VDI-MEG – 75th International Conference on Agricultural Engineering. LANDTECHNIK AgEng 2017. The Forum for Agricultural Engineering Innovations, Hannover, 10–11, November, 2017. Hannover, 2017. P. 175–184.

12. Попиков П. И. Моделирование рабочих процессов энергосберегающего гидропривода технологического оборудования лесотранспортной машины // Лесотехнический журнал. 2015. № 1. С. 225–234.

13. Башкиров В. А. Параметры аккумуляторной установки системы рекуперации энергии опускания рабочего оборудования экскаватора // Строительные и дорожные машины. 1989. № 1. С. 10–12.

14. Официальный сайт проекта Forwarder 2020. URL: https://www.forwarder2020-project.eu (дата обращения 03.03.2020).

15. Голякевич С. А., Гороновский А. Р. Основы проектирования лесных машин и системы автоматизированного проектирования. Минск: БГТУ, 2016. 139 с.

16. Мирошников В.С. Справочник таксатора. Минск: Ураджай, 1980. 360 с.

17. Рябов И. М., Ширяев С. А., Юсупов Ю. Г. Формирование структуры пневмогидравлической системы рекуперации и энергии торможения мобильной машины, обеспечивающей высокую надежность // Материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Владикавказ, 30 сент. – 1 окт. 2016 г. / ФГБОУ ВО «Горский госагроуниверситет». Владикавказ, 2016. С. 114–119.

18. Голякевич С. А., Гороновский А. Р. Аспекты топливной экономичности многооперационных лесных машин // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., г. Могилев, 27–28 апр. 2017 г. Могилев: Белорус. Рос. ун-т, 2017. С. 207–208.

19. Голякевич С. А. Энергетические аспекты функционирования многооперационных лесозаготовительных машин // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 26–28 апр. 2017 г. Минск: БГТУ, 2017. С. 64–68.

20. Голякевич С. А. Применение систем адаптивного управления для повышения реализации энергетического потенциала харвестерами // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2017. № 2 (198). С. 238–244.

References

1. Kim Y. J., Filipi Z. Simulation study of a series hydraulic hybrid propulsion system for a light truck. *SAE Technical Paper 2007-01-4151*. Allegeini, Evoqua Water Technologies LLC Publ., 2007. 17 p.

2. Bodnar' I. V., Evgrafov S. V., Knyazev I. M. Possibilities of energy recovery in transport and technological vehicles. *Arkhitekturno-stroitel'nyy i dorozhno-transportnyy kompleksy: problemy, perspektivy, novatsii: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Architectural and construction and road transport complexes: problems, prospects, innovations: International materials scientific and technical conference], Omsk, 2016, pp. 497–502 (In Russian).

3. Nabokin A. V., Posmet'ev V. I., Nikonov V. O. Improving the efficiency of cars through the recovery of energy from their units and systems. *Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskiy vestnik* [Voronezh scientific and technical bulletin], 2019, no. 4 (18), pp. 11–19 (In Russian).

4. Nikonov V. O., Posmet'ev V. I., Latysheva M. A. Problem status and overview of vehicle structures with braking energy recovery systems. *Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskiy vestnik* [Voronezh scientific and technical bulletin], 2018, no. 2 (24), pp. 4–19 (In Russian).

5. Bazhanov V. I., Sgadlev A. M. Analysis of the effectiveness of the hydraulic system for recovering vehicle braking energy. *Simvol nauki* [Symbol of science], 2016, no. 9–1 (21), pp. 20–23 (In Russian).

6. Vas'kovskiy Yu. N., Poda M. V. Modeling of electromechanical vehicle energy recovery systems. *Tekhnichna elektrodinamika* [Technical electrodynamics], 2019, no. 4, pp. 33–41 (In Russian).

7. Posmet'ev V. I., Nikonov V. O. Simulation of hydraulic energy recovery in a pneumohydraulic fifth wheel coupling device of a forest tractor with a semitrailer. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2019, vol. 7, no. 3 (46), pp. 213–220 (In Russian).

8. Yan Shuai, Sun Weichao. Energy regeneration scheme and self-powered criterion of motor-driven active suspension. *35th Chinese Control Conference*, Chengdu China, 2016, pp. 8926–8931.

9. Bykadorov A. L., Zarutskaya T. A., Karbinov A. V. To the question of the quality of excess energy recovery. *Sovershenstvovanie organizatsii i upravleniya perevozkami v usloviyakh reform: mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Improving the organization and management of transportation in the context of reform: an inter-university collection of scientific papers], Rostov, 2002, pp. 212–215 (In Russian).

10. Nikonov V. O., Posmet'ev N. I. Recovery of hydraulic energy of a boom of a hydraulic manipulator of a forest truck. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2018, vol. 6, no. 4 (40), pp. 177–183 (In Russian).

11. Geiger C., Geimer M. Efficiency optimisation of a forestry crane by implement hydraulics with energy recovery. *VDI-MEG – 75th International Conference on Agricultural Engineering. LANDTECHNIK AgEng 2017. The Forum for Agricultural Engineering Innovations*. Hannover, 2017, pp. 175–184.

12. Popikov P. I. Modeling of working processes of energy-saving hydraulic drive of technological equipment of a forest transport machine. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forestry journal], 2015, no. 1, pp. 225–234 (In Russian).

13. Bashkirov V. A. Parameters of the battery installation of the energy recovery system for lowering the excavator working equipment. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Construction and road cars], 1989, no. 1, pp. 10–12 (In Russian).

14. Official site of project Forwarder 2020. Available at: https://www.forwarder2020-project.eu (accessed 03.03.2020).

15. Golyakevich S. A., Goronovskiy A. R. *Osnovy proektirovaniya lesnykh mashin i sistemy automatizirovannogo proektirovaniya* [Basics of forest machinery design and computer-aided design]. Minsk, BSTU Publ., 2016. 139 p.

16. Miroshnikov V. S. *Spravochnik taksatora* [Directory of taxotere]. Minsk, Uradzhay Publ., 1980. 360 p.

17. Ryabov I. M., Shiryaev S. A., Yusupov Yu. G. Formation of the structure pneumohydraulic system of recovery and braking energy of a mobile machine, providing high reliability. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii FGBOU VO "Gorskiy gosagrouniversitet"* [Materials of the international scientific-practical conference of Gorsky State Agro-University], Vladikavkaz, 2016, pp. 114–119 (In Russian).

18. Golyakevich S. A., Goronovskiy A. R. Fuel economy aspects of multioperational forest machines. *Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Materials, equipment and resource-saving technologies: materials of the International scientific and technical conference], Mogilev, 2017, pp. 207–208 (In Russian).

19. Golyakevich S. A. Energy aspects of multioperational forest machines functioning. *Lesozagotovitel'noe proizvodstvo: problemy i resheniya: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Logging production: problems and solutions: materials of International scientific and technical conference]. Minsk, 2017, pp. 64–68 (In Russian).

20. Golyakevich S. A. Application of adaptive control systems to increase the realization of energy potential of harvesters. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry, Nature Management and Renewable Resources Processing, no. 2 (198), pp. 238–244 (In Russian).

Информация об авторах

Голякевич Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: gsa@belstu.by

Карсюк Роман Александрович – студент. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: karsiuk@belstu.by

Information about the authors

Golyakevich Sergey Aleksandrovich – PhD (Engineering), Associated Professor, Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gsa@belstu.by

Karsyuk Roman Aleksandrovich – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: karsiuk@belstu.by

Поступила 10.03.2020

УДК 630*36:621.9

С. А. Голякевич[1], М. К. Асмоловский[1], Е. А. Станкевич[2]
[1]Белорусский государственный технологический университет
[2]ОАО «Сморгонский агрегатный завод»

КОНЦЕПЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МАЛОГАБАРИТНОГО ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННОГО ТРАКТОРА С ЭЛЕКТРОСИЛОВЫМ ПРИВОДОМ ДЛЯ МЕХАНИЗАЦИИ РАБОТЫ В ТЕПЛИЦАХ ЛЕСОПИТОМНИКОВ

В статье проведен анализ лесопитомничьего хозяйства Республики Беларусь. Отмечены основные производственные характеристики такого хозяйства. Описаны технологии выращивания лесных культур в теплицах, их конструкции и применяемое в настоящее время оборудование. Указано, что наиболее перспективным направлением механизации работ в теплицах является использование малогабаритных тракторов с электрической тягой либо тракторов с дизельным силовым агрегатом, оборудованным камерами и возможностью дистанционного управления посредством STL-каналов связи. Оценены перспективы таких способов и по результатам анализа предложено создание малогабаритного трактора на электрическом ходу. В качестве положительного эффекта от его внедрения указаны: улучшение условий труда оператора в закрытом пространстве теплицы, возможность полного контроля машины и присутствия непосредственно в месте осуществления работ.

Проанализированы конструкции малогабаритных тракторов, производимых отечественными предприятиями, а также существующее для них навесное и прицепное технологическое оборудование. В качестве базового шасси для таких машин принят трактор Беларус-152 производства ОАО «Сморгонский агрегатный завод». Рассмотрены варианты разработки технологического оборудования для дополнительного оснащения перспективного трактора. В заключении статьи приводятся проблемные вопросы, которые необходимо решить в рамках НИОКР при создании подобных тракторов.

Ключевые слова: лесопитомник, теплица, трактор, малые габариты, электросиловой привод, дистанционное управление, энергия, выращивание, технология, оборудование.

S. A. Golyakevich[1], M. K. Asmolovskiy[1], Ye. A. Stankevich[2]
[1]Belarusian State Technological University
[2]OJSC “Smorgon Assembly Plant”

THE CONCEPT OF A SMALL SIZE FORESTRY TRACTOR WITH ELECTRIC POWER DRIVE FOR MECHANIZATION OF WORK IN GREENHOUSES OF FORESTRY

The article considers analysis of forestry and farming of the Republic of Belarus is carried out. The main production characteristics of such an economy are noted. The technologies for growing forest crops in greenhouses, their design and currently used equipment are described. It is indicated that the most promising area of mechanization of work in greenhouses is the use of small tractors with electric traction or tractors with a diesel power unit equipped with cameras and the ability to remotely control via STL communication channels. The prospects of such methods are estimated and, based on the analysis results, the creation of a small-sized tractor on an electric course is proposed. The following are indicated as a positive effect of its implementation: improvement of the operator’s working conditions in the enclosed space of the greenhouse, the possibility of complete control of the machine and presence directly at the place of work.

The designs of small tractors manufactured by domestic enterprises, as well as the mounted and trailed technological equipment existing for them, are considered. The Belarus-152 tractor manufactured by OJSC “Smorgon Assembly Plant” was adopted as the basic chassis for such machines. The development options of technological equipment for additional equipment of a promising tractor are considered. The article concludes with problematic issues, that need to be addressed within the framework of R&D when creating such tractors.

Key words: nursery, greenhouse, tractor, small size, electric power drive, remote control, energy, cultivation, technology, equipment.

Введение. Внедрение в лесохозяйственное производство новых видов техники является приоритетным направлением инвестиционной деятельности в лесном хозяйстве. Такие инвестиции

позволяют значительно сократить, а часто и исключить тяжелый ручной труд, улучшить условия труда работников лесного хозяйства, повысить его качество и эффективность. Глобальной мировой тенденцией механизации является переход на использование машин с электросиловыми приводами движителей и оборудования. Одним из перспективных направлений их применения в лесном хозяйстве является механизация работ в закрытых теплицах лесопитомников.

Целью данной работы является анализ перспектив использования малогабаритных тракторов с электрической тягой для работы в теплицах лесопитомников.

Основная часть. В системе Министерства лесного хозяйства насчитывается 74 постоянных лесных питомника общей площадью свыше 1,3 тыс. га. В целом по отрасли построено 69 теплиц общей площадью 3,7 га. Общая площадь имеющихся теплиц уже составляет 17,71 га, в том числе с осуществлением рампового полива – 2,9 га (28 теплиц).

Всего в питомниках лесхозов выращивается около 415 млн шт. стандартного посадочного материала. В теплицах выращено более 33,7 млн шт., в том числе 20,8 млн. шт. посадочного материала с закрытой корневой системой.

Таким образом, выращивание посадочного материала для нужд лесовосстановления [1–6] широко распространено в лесхозах республики. Опыт показывает, что перспективным для лесовосстановления является молодой (возраст 1–2 года), но достаточно крупный посадочный материал, который хорошо приживается и лучше противостоит зарастанию травянистой растительностью. Таким требованиям отвечают сеянцы, выращенные в теплицах. Экологические условия в теплицах в сочетании с регулярными поливами обусловливают более высокую энергию прорастания и грунтовую всхожесть семян по сравнению с открытыми питомниками, особенно это актуально для ели европейской, показатели грунтовой всхожести которой в открытом грунте являются проблемой.

В последние годы основные объемы инвестиций использованы на приобретение техники для выполнения работ [7], техническое переоснащение и развитие инфраструктуры питомнического хозяйства, строительство новых питомников и теплиц в целях выращивания посадочного материала для создания лесных культур, декоративного посадочного материала, выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой. В результате лесное хозяйство обеспечено полностью собственным посадочным материалом, а ежегодная реализация на экспорт составляет порядка 33 млн шт., в целом питомническое хозяйство является окупаемым.

Развитие тепличного хозяйства лесхозов необходимо увязать с введенными в эксплуатацию и планируемыми к строительству тепличными комплексами. Тепличное хозяйство лесхозов должно быть представлено современными теплицами с рамповым поливом и системой автоматического контроля микроклимата.

Для выращивания посадочного материала могут использоваться крупногабаритные передвижные теплицы, которые бывают блочного или тоннельного типа и состоят из взаимосвязанных секций, высота которых 2,5 м, ширина 6,0–7,5 м, длина может быть различная. Основные требования, предъявляемые к конструкции теплиц: их ветроустойчивость, удобство и простота в эксплуатации, возможность комплексной механизации работ. Этим требованиям в наибольшей мере удовлетворяют стационарные теплицы, в которых посадочный материал выращивают на специальном субстрате на поверхности земли. Габариты этих теплиц позволяют механизировать все технологические операции по выращиванию посадочного материала, а с помощью автоматики – создавать и поддерживать в заданных пределах оптимальные режимы освещения, влажности и температуры почвы и воздуха.

Стационарные теплицы в зависимости от формы перекрытия крыши, вида и материала несущих конструкций, материала покрытий, характера микроклимата и т. д. подразделяются на различные типы. Чаще стационарные теплицы бывают блочного и арочного типов. Первые состоят из отдельных блоков, высота которых в карнизе составляет 2,2 м, в коньке – 4,1 м, ширина – 6 м, длина – 48 м. Теплицы арочного типа имеют несущие конструкции в виде арок.

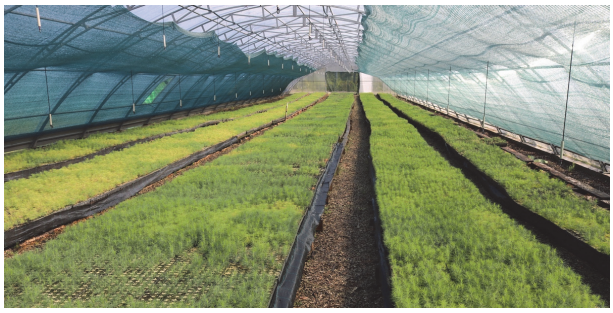


Рис. 1. Теплица лесопитомника (вид внутри)

Исследованиями [8] подтверждено, что проведение комплекса агротехнических мероприятий, включающих регулярные поливы, внесение в субстрат минеральных удобрений, проведение подкормок комплексным удобрением со сбалансированным соотношением макро- и микроэлементов, борьбу с болезнями и сорняками с использованием современных средств защиты, позволяет добиться высокого выхода

стандартных сеянцев с 1 м^2 площади теплицы. Такая технология в закрытом грунте способствует высокой грунтовой всхожести семян, которая для сосны составляет 90–92%, а выход стандартных сеянцев в пересчете на 1 га закрытого грунта составляет порядка 10 млн шт. Однолетние сеянцы сосны, выращенные в теплице, по средней высоте и диаметру корневой шейки значительно превосходят нормативные биометрические показатели. При этом агротехника и технология выращивания требуют постоянного совершенствования в связи с необходимостью применения новых средств механизации.

Для выращивания сеянцев в стационарных теплицах используют рыхлый субстрат, который слабо уплотняется и не требует рыхлений, мало заселен семенами трав, обладает антисептическими свойствами и не имеет инфекционных грибных болезней. Одним из лучших субстратов является фрезерный верховой торф. Он не слеживается, характеризуется хорошими водно-воздушными свойствами и высокой стерильностью. Перед посевом готовят гряды шириной 1,0–1,2 м, которые отделяют междугрядковыми дорожками шириной 0,3–0,4 м. Посев семян может производиться при температуре субстрата 5–6°С.

Применяемая в настоящее время технология выращивания посадочного материала, в том числе в защищенном грунте (обработка почвы и т. д.), в основном базируется на применении тракторов класса тяги 6 кН (МТЗ-320.4) [8] и заключается в том, что непосредственно перед посевом осуществляется фрезерование субстрата с нарезкой посевных лент. Посев проводится сеялкой «Эгедаль». Семена высеваются вразброс, норма высева составляет 78 кг/га, глубина заделки – 0,5 см. После этого посевы прикатывают катком и мульчируют торфом слоем 1,0–1,5 см. Все виды подкормок проводятся трактором, агрегатируемым с культиватором ГС «Эгедаль». Однако существенными недостатками применения тракторов высокого тягового класса являются значительные габариты агрегатов, сформированных на его базе, и большой выброс остаточных газов, что позволяет использовать их только при работе на открытом грунте.

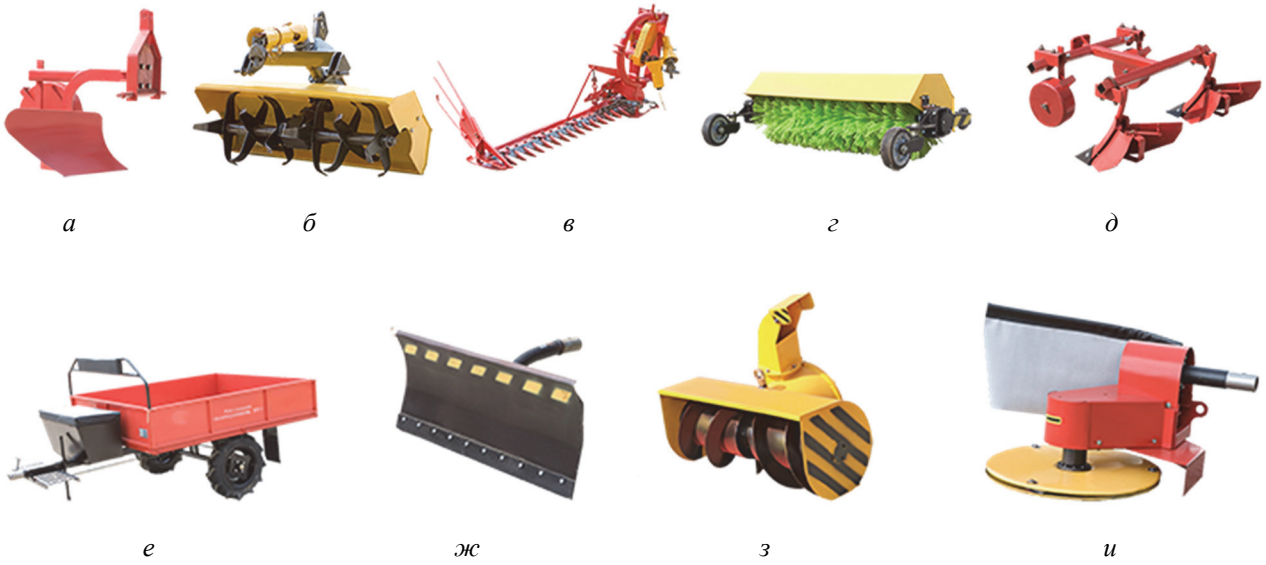
Ограниченное пространство теплицы не дает возможности применять трактор общего назначения, а использование малогабаритных тракторов с дизельным двигателем приводит к значительному загрязнению продуктами сгорания закрытого пространства теплицы, задымлению и созданию неприемлемых для работы людей условий. Поэтому большинство проводимых работ приходится выполнять вручную, что актуализирует разработку научных подходов, необходимость обоснования технологий и машин для комплексной механизации тепличного хозяйства лесопитомников.

Существует несколько возможностей обеспечения требуемых условий работы в закрытых теплицах лесопитомников. Это разработка систем удаленного управления тракторами посредством STS-каналов беспроводной связи [9], при которой оператор может находится вне теплицы и получать информации с камер, установленных на тракторе, либо создание малогабаритного трактора с электросиловым приводом, при использовании которого исключается возможность выброса вредных веществ в атмосферу.

Использование тракторов с электротрансмиссией представляется наиболее предпочтительным [10–14], так как обеспечивается непосредственное присутствие человека в месте проведения работы, что позволяет оперативно вносить изменения в процесс работы машины при возникновении производственной необходимости. Базой для таких малогабаритных тракторов могут стать уже существующие образцы с дизельным двигателем. Их производство в Республике Беларусь налажено на ОАО «Сморгонский агрегатный завод». Наиболее предпочтительным для этого является трактор Беларус-152 (рис. 2).

Рис. 2. Малогабаритный трактор Беларус-152 (ОАО «Сморгонский агрегатный завод»)

Помимо малых габаритов, трактор с электросиловым приводом должен иметь возможность агрегатироваться с большинством существующего и перспективного технологического оборудования, предназначенного для работы в лесопитомниках. В настоящее время ОАО «Сморгонский агрегатный завод» выпускает широкую номенклатуру навесных и прицепных, активных и пассивных рабочих органов для малогабаритного трактора «Беларус-152 (рис. 3).



а *б* *в* *г* *д*

е *ж* *з* *и*

Рис. 3. Навесное и прицепное оборудование для малогабаритных тракторов, выпускаемое на ОАО «Сморгонский агрегатный завод»:
а – плуг универсальный; *б* – фреза почвенная; *в* – косилка малогабаритная; *г* – коммунальные щетки; *д* – универсальный окучник; *е* – прицеп; *ж* – отвал навесной; *з* – снегоочиститель; *и* – косилка роторная

Вне зависимости от выбранного направления создания трактора [15] (дистанционно управляемый или с электротягой) существует возможность последующей автоматизации процесса движения трактора на основе использования управляющих компьютерных программ. При этом зона работы трактора может ограничиваться сенсорными вешками, выставленными по контуру обрабатываемого участка, либо координатами GPS/ГЛОНАСС. В первом случае достигается наибольшая точность позиционирования трактора, во втором – возможна наиболее простая реализация движения.

Заключение. Создание тракторов с электросиловым приводом требует глубокого анализа мер обеспечения безопасности и комфорта оператора и использования большого количества актуальных и перспективных технологий, которые ранее не применялись на лесохозяйственной технике. Разработка таких машин является важной научно-практической задачей, которая ранее не решалась в отечественном лесном машиностроении. Использование в конструкциях машин ряда новых технических решений требует разработки математических моделей и компьютерных программ для оценки тяговых свойств и обеспечения рациональной энергонасыщенности, анализа режимов технологического нагружения, моделирования работы привода, оценки параметров производительности и экономичности с их последующим анализом. Кроме теоретического обоснования требуются практические испытания электросиловых установок и их отдельных узлов в лабораторных, полигонных и типичных эксплуатационных условиях.

На начальном этапе создания малогабаритного трактора с электросиловым приводом необходимо осуществить оценку его тяговых, сцепных свойств и запаса хода при работе с почвенными фрезами и прицепами. В дальнейшем номенклатура используемого оборудования может расширяться. К примеру, перспективным вариантом модернизации щеточного коммунального оборудования является применение вместо щеточных наборных элементов специальных дисков с заданным расстоянием между ними для нарезки посевных лент.

Возможности агрегатирования с широкой линейкой существующего и перспективного оборудования позволят такому трактору быть задействованным круглогодично не только для обслуживания тепличного хозяйства, но и при работе в лесопитомниках на открытом грунте.

Разработка трактора с электросиловой трансмиссией также может стать перспективной научно-технической основой для создания полногабаритных тракторов с электросиловым приводом.

Список литературы

1. Родин А. Р. Интенсификация выращивания лесопосадочного материала. М.: Агропромиздат, 1989. 78 с.

2. Якимов Н. И., Гвоздев В. К., Праходский А. Н. Лесные культуры и защитное лесоразведение. Минск: БГТУ, 2007. 311 с.

3. Крук Н. К., Якимов Н. И., Волкович А. П. Современные технологии выращивания саженцев в уплотненной школе // Труды БГТУ. 2013. № 1: Лесное хоз-во. С. 152–156.

4. Носников В. В., Волкович А. П. Особенности выращивания посадочного материала липы мелколистной // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во. 2008. Вып. XVI. С. 194–195.

5. Kim Y. J., Filipi Z. Simulation study of a series hydraulic hybrid propulsion system for a light truck // SAE Technical Paper 2007-01-4151. Allegeini: Evoqua Water Technologies LLC, 2007. 17 p.

6. Якимов Н. И., Крук Н. К., Юреня А. В. Агротехника выращивания сеянцев сосны обыкновенной в условиях закрытого грунта // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2018. № 1 (204). С. 25–30.

7. Анализ тенденций развития конструкций многооперационных лесозаготовительных машин / С. П. Мохов [и др.] // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 18–20.

8. Наставление по выращиванию посадочного материала древесных и кустарниковых видов в лесных питомниках Республики Беларусь: ТКП 575-2015/ПР1. Введ. 15.12.2015. Минск: М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 2015. 60 с.

9. Голякевич С. А., Пищов С. Н. Информационные технологии в лесном комплексе. Минск: БГТУ, 2018. 123 с.

10. Голякевич С. А. Энергетические аспекты функционирования многооперационных лесозаготовительных машин // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 26–28 апр. 2017 г. Минск: БГТУ, 2017. С. 64–68.

11. Голякевич С. А., Гороновский А. Р., Мохов С. П. Результаты имитационного моделирования работы гидравлической системы форвардера в MatLab / Simulink / Simscape // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2019. № 1 (216). С. 126–131.

12. Yan Shuai, Sun Weichao. Energy regeneration scheme and self-powered criterion of motor-driven active suspension // 35th Chinese Control Conference, Chengdu China, 27–29 July, 2016. Chengdu China, 2016. P. 8926–8931.

13. Hesse K. Components and systems for tractor, stacker and combine // Bosch Rexroth Mobile Training. Elchingen, 2003. P. 18–20.

14. An interactive simulation system for modeling stands, harvests, and machines / J. Wang [et al.] // Journale of forest engineering. 1999. Vol. 10, no. 1. P. 81–99.

15. Жуков А. В. Теоретические основы выбора технических параметров и улучшения эксплуатационных свойств специальных лесных машин: дис. … д-ра техн. наук: 05.21.01. Л., 1987. 315 с.

References

1. Rodin A. R. *Intensifikatsiya vyrashchivaniya lesoposadochnogo materiala* [Intensification of growing forest planting material]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1989. 78 p.

2. Yakimov N. I., Gvozdev V. K., Prahodskiy A. N. *Lesnye kul'tury i zashchitnoye lesorazvedeniye* [Forest plantations and protective wood cultivation]. Minsk, BGTU Publ., 2007. 312 p.

3. Kruk N. K., Yakimov N. L., Volkovich A. P. Modern technology of growing seedlings in compacted school. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 1: Forestry, pp. 152–156 (In Russian).

4. Nosnikov V. V., Volkovich A. P. Features of cultivation of planting material Linden. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forestry, 2008, issue XVI, pp. 194–195 (In Russian).

5. Kim Y. J., Filipi Z. Simulation study of a series hydraulic hybrid propulsion system for a light truck. *SAE Technical Paper 2007-01-4151*, Allegeini, Evoqua Water Technologies LLC Publ., 2007. 17 p.

6. Yakimov N. I., Kruk N. K., Yurenya A. V. Agricurtural cultivation of seedlings of scots pine in a greenhouse. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2018, no. 1 (204): Forestry, Nature Management and Renewable Resources Processing, pp. 25–30 (In Russian).

7. Mokhov S. P., Golyakevich S. A., Pishchov S. N., Ariko S. Ye. Analysis of trends in the development of multioperational forest machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forest and Woodworking Industry, 2012, no. 1 (209), pp. 18–20 (In Russian).

8. TKP 575-2015/PR1. The manual on the growing of planting material of tree and shrub species in forest nurseries of the Republic of Belarus. Minsk, Ministry of Forestry of Republic of Belarus Publ., 2015. 60 p. (In Russian).

9. Golyakevich S. A., Pishchov S. N. *Informatsionnye tekhologii v lesnom komplekse* [Information technologies in the forest complex]. Minsk, BGTU Publ., 2018. 123 p.

10. Golyakevich S. A. Energy aspects of multioperational forest machines functioning. *Lesozagotovitel'noe proizvodstvo: problemy i resheniya: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Logging production: problems and solutions: materials of International scientific and technical conference]. Minsk, 2017, pp. 64–68 (In Russian).

11. Golyakevich S. A., Goronovskiy A. R., Mohov S. P. Results of simulation modeling of the hydraulic system of forwarder in MatLab / Simulink / Simscape. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forestry, Nature Management and Renewable Resources Processing, 2019, no. 1 (216), pp. 126–131 (In Russian).

12. Yan Shuai, Sun Weichao. Energy Regeneration Scheme and Self-powered Criterion of Motor-driven Active Suspension. *35th Chinese Control Conference*, Chengdu China, 2016, pp. 8926–8931.

13. Hesse K. Components and systems for tractor, stacker and combine. *Bosch Rexroth Mobile Training.* Elchingen, 2003, pp. 18–20.

14. Wang J. [et al.] An interactive simulation system for modeling stands, harvests, and machines. *Journale of Forest Engineering*, 1999, vol. 10, no. 1, pp. 81–99.

15. Zhukov A. V. *Teoreticheskie osnovy vybora tekhnicheskikh parametrov i uluchsheniya ekspluatatsionnykh svoistv spetsial'nykh lesnykh mashin: dis. ... d-ra tekhn. nauk.* Theoretical bases of a choice of technical parameters and improvement of operational properties of special forest machines: absrtact of thesis DSc (Engineering). Leningrad, 1987. 315 p.

Информация об авторах

Голякевич Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: gsa@belstu.by

Асмоловский Михаил Корнеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: asmolovsky@belstu.by

Станкевич Евгений Александрович – главный инженер. ОАО «Сморгонский агрегатный завод» (231000, г. Сморгонь, пр-т Индустриальный, 27, Республика Беларусь). E-mail: saz_pr@tut.by

Information about the authors

Golyakevich Sergey Aleksandrovich – PhD (Engineering), Associated Professor, Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gsa@belstu.by

Asmolovskiy Mikhail Korneevich – PhD (Engineering), Associated Professor, Assistant Professor, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: asmolovsky@belstu.by

Stankevich Yevgeniy Aleksandrovich – Chief Engineer. OJSC "Smorgon Assembly Plant" (27, Industrialniy Ave., 231000, Smorgon, Republic of Belarus). Email: saz_pr@tut.by

Поступила 10.03.2020

УДК 625.084

Н. В. Хорошун[1], **М. Т. Насковец**[2]
[1]Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь
[2]Белорусский государственный технологический университет

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ НАВЕСНОЙ ТРАМБОВОЧНОЙ ВИБРАЦИОННОЙ ПЛИТЫ С ШИРИНОЙ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ДО 4,0 М

В статье обоснован подход к созданию отечественной импортозамещающей дорожной техники на примере навесной трамбовочной вибрационной плиты с шириной рабочей зоны до 4,0 м. Статья включает краткий обзор существующих вибрационных плит, а также исследований, направленных на совершенствование технологий и оборудования для уплотнения лесохозяйственных дорог при их содержании и обслуживании. Также приведены расчеты гидравлического привода оборудования для выполнения этих операций при непрерывном движении.

Приведена разработанная конструкция навесной трамбовочной вибрационной плиты с шириной рабочей зоны до 4,0 м, применение которой позволит устранить недостатки серийно выпускаемого навесного оборудования, увеличить эффективность его работы и уменьшить непроизводственные временные и ресурсные затраты.

Одновременно представлен расчет параметров и выбор основного гидравлического оборудования для отечественной импортозамещающей навесной трамбовочной вибрационной плиты, которая предназначена для агрегатирования с трактором производства ОАО «Минский моторный завод» или аналогичным.

Цель работы: провести технологические изыскания и конструкторские расчеты в целях усовершенствования конструкции отечественной импортозамещающей навесной трамбовочной вибрационной плиты с шириной рабочей зоны до 4,0 м с возможностью уплотнения внешних частей проезжей части дорог и (или) обочин.

Ключевые слова: лесохозяйственные дороги, машины и оборудование, гидравлический привод, навесная виброплита, глубина уплотнения.

N. V. Khoroshun[1], **M. T. Naskovets**[2]
[1]Ministry of Forestry of the Republic of Belarus
[2]Belarusian State Technological University

JUSTIFICATION OF PARAMETERS OF THE IMPROVED DESIGN OF THE HINGED TAMPER VIBRATION PLATE WITH A WORKING AREA NO MORE THAN 4.0 METERS

The article presents an approach to the creation of domestic import-substituting road equipment on the example of a hinged tamper vibration plate with a working area no more than 4.0 meters. The article includes a brief overview of research aimed at improving technologies and equipment for compacting forest road facilities during their maintenance and repair. Special attention is paid to the calculations of the hydraulic drive of the equipment for performing these operations in continuous motion.

The article substantiates the design of a mounted tamper vibration plate with a working area no more than 4.0 meters, which allows to eliminate the disadvantages of mass-produced attachments, increase the efficiency of its operation and reduce non-production time and resource costs.

At the sometime, the calculation of parameters and selection of the main hydraulic equipment of the domestic import-substituting mounted ramming vibration plate, which is intended for aggregation with a tractor produced by JSC “Minsk Tractor Plant” or other.

Purpose: to conduct technological research and design calculation in order to improve the design of the domestic import-substituting mounted ramming vibration plate with a working area no more than 4.0 m with the possibility of compacting the external parts of the roadway and (or) verges.

Key words: forestry roads, machinery and equipment, hydraulic drive, mounted vibration plate, seal depth.

Введение. Техническое перевооружение дорожных ремонтно-строительных участков направлено на создание отечественной системы машин и механизмов, обеспечивающих высококачественное содержание и обслуживание лесохозяйственных дорог, максимальную

автоматизацию работ при минимально возможных затратах.

В настоящее время при техническом перевооружении ряд низкоэффективной отечественной дорожно-строительной техники заменяется конкурентоспособной импортной техникой.

Для успешного решения проблем импортозамещения необходимо вначале сформировать отечественную систему машин под применяемые и перспективные технологии. Далее необходимо проанализировать конструкции одинаковых типов существующих машин, установить причины неиспользования машин и оборудования отечественного производства (отсутствие выпуска нужного типоразмера и производительности, надежность и т. д.).

Далее необходимо определить возможность замены импортных машин и оборудования отечественными.

Лучшая техника, выпуск аналогов которой можно освоить в Беларуси, изучается детально. Проводятся исследования, позволяющие создать конкурентоспособный отечественный аналог, устанавливаются зависимости критериев оценки создаваемого импортозамещающего аналога, его параметров, условий и режимов работы, определяются основные параметры, режимы работы и т. д. [1, 2, 3, 4].

Применяя данный подход, нами принято решение о разработке отечественной навесной трамбовочной вибрационной плиты с шириной рабочей зоны до 4,0 метров.

Основная часть. На рынке стран ЕЭК представлены в основном зарубежные производители навесных виброплит:

1) итальянские производители:

– вибротрамбующие плиты GHENDINI ing FABIO;

– виброплиты Indeco;

– навесное трамбовочное оборудование Simex;

– вибрационные плиты SPV;

2) немецкие производители:

– уплотнитель-трамбовщик серии VP компании LST;

– трамбовочные вибрационные пластины для уплотнения грунта при строительстве компании Stehr Plattenverdichter;

– трамбовщик траншей для уплотнения грунта компании Stehr Plattenverdichter;

– 6-угольная трамбовочная виброплита для уплотнения грунта компания Stehr Plattenverdichter;

3) навесная виброплита VPN-2400 на МТЗ производства ООО «ТЕХМАР», г. Рыбинск, Ярославская область, Российская Федерация.

Характеристики отдельных навесных виброплит приведены в табл. 1.

В Республике Беларусь производители виброплит отсутствуют.

Указанное навесное оборудование позволяет эффективно уплотнять грунт при строительстве и может устанавливаться на различную спецтехнику, включая минипогрузчики, тракторы, грейдеры и катки [5, 6].

Конструкция виброплиты обеспечивает полную передачу ударной энергии в грунт и не создает существенных нагрузок на корпус энергетического средства.

Благодаря заложенным в конструкцию виброплиты оптимальным амплитудно-частотным параметрам за один проход достигается глубина уплотнения 0,4–0,7 м.

Таблица 1

Характеристика виброплит

Наименование характеристики	Модель	
	Stehr ЗСО 80 3 ХК	VPG-2400
Производитель	Stehr Plattenverdichter	ООО «ТЕХМАР»
Масса, кг	1180	1210
Габаритные размеры, Д×Ш×В, мм	1100×2200×850	1000×2400×800
Центробежная сила вибратора, кН	3×60	3×(42–60)
Частота колебаний, Гц	<70	<60
Амплитуда, мм	1,4	–
Ширина рабочей плиты, м	2,160	2,370
Эффективная рабочая поверхность, м^2	1,22	1,26
Глубина уплотнения, м	0,4	0,7
Скорость движения, км/ч	0,6–1,5	0,5–2,0
Привод	Гидромотор	Редуктор от ВОМ
Толщина плит, мм	20	20
Мощность, не менее, л. с.	60	60
Гидропоток, не менее, л/мин	200	50–70
Рабочее давление, bar	70	180

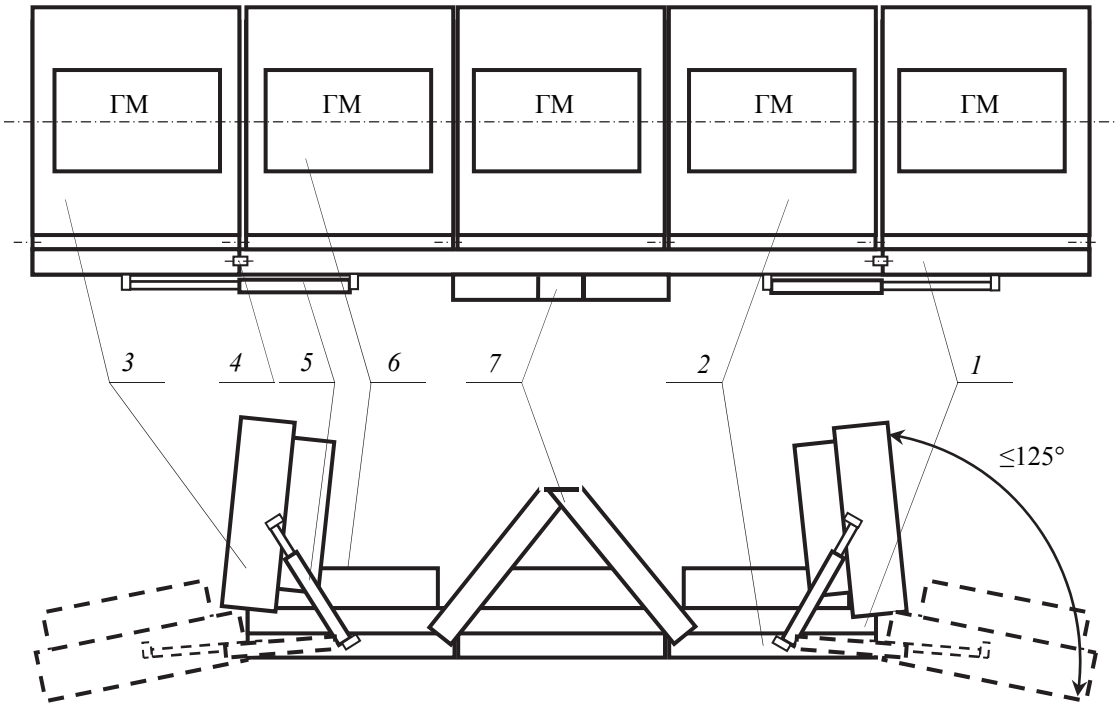


Рис. 1. Схема навесной трамбовочной вибрационной плиты:
1 – рама; *2* – секции виброплиты с эксцентриками; *3* – дополнительные аналогичные секции виброплиты с эксцентриками; *4* – шарниры; *5* – гидроцилиндры; *6* – гидромоторы (ГМ); *7* – устройство навески

Результат уплотнения серьезно улучшается благодаря сочетанию возмущающей силы и высокой частоты колебаний уплотнительных сил различных направлений и частот. Процесс уплотнения заменяет дорожный каток различной массы. Трамбовочные виброплиты могут быть одинарными, двойными и тройными.

Изучение характеристик и конструкций навесных виброплит позволило выявить следующие существенные недостатки.

1. Ширина рабочей плиты находится в диапазоне от 1,9 до 2,4 м. В данном случае эффективность ее применения на лесохозяйственных дорогах шириной до 3,0 м высокозатратная, так как приходится делать уплотнение в два прохода и зона перекрытия составляет от 0,8 до 1,8 м.

2. Конструкции навесных виброплит в основном работают в одной плоскости, что затруднительно при уплотнении внешних частей проезжей части дорог, особенно обочин [7, 8].

На основе конструкторских и технологических изысканий нами предлагается конструкторская разработка усовершенствованной конструкции навесной трамбовочной вибрационной плиты с шириной рабочей зоны до 4,0 м с возможностью уплотнения внешних частей проезжей части дорог и (или) обочин, технологическая схема и компоновка которой представлена на рис. 1.

Разработанная усовершенствованная конструкция навесной трамбовочной вибрационной плиты состоит из рамы *1*, к которой крепятся три секции *2* виброплиты с эксцентриками *6*, приводимыми в действие гидромоторами (ГМ). На шарнирах *4* к раме *1* прикреплены две дополнительные аналогичные секции *3*, приводимые из транспортного положения в рабочее гидроцилиндрами *5*.

Навесная трамбовочная вибрационная плита агрегатируется с трактором МТЗ с помощью устройства *7*.

В конструкции навесной трамбовочной пластины предлагается установить два встречно вращающихся эксцентрических вала (см. рис. 2).

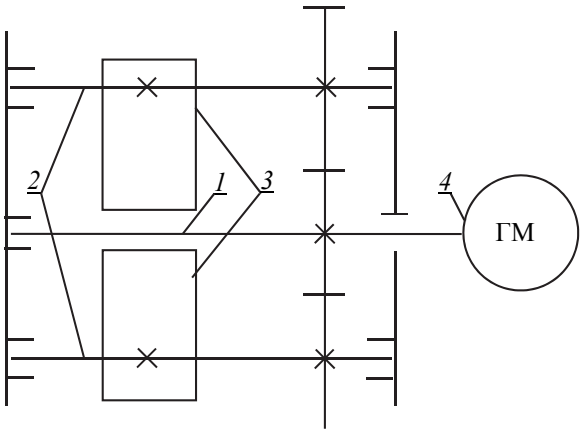


Рис. 2. Схема привода конструкции встречно вращающихся эксцентрических валов:
1 – ведущий вал; *2* – ведомый вибровал;
3 – эксцентрик; ГМ – гидромотор

Данное конструкторское решение делает возможным направить силу на уплотняемую поверхность строго вертикально. При этом используется вся уплотнительная мощность и достигается более высокая производительность уплотнения грунта по сравнению с традиционными системами.

Расчет параметров и выбор основного гидрооборудования: гидродвигателя и гидроцилиндров. Так как сконструированная навесная трамбовочная вибрационная плита будет агрегатироваться с трактором МТЗ, то все гидрооборудование (гидродвигатели и насосы) будут приводиться в действие от гидросистемы трактора [9].

Технические характеристики гидросистемы трактора МТЗ-82.1 (Беларус-82.1), в том числе насоса, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики гидросистемы трактора МТЗ-82.1 (Беларус-82.1)

Наименование показателя	Значение
Грузоподъемность заднего навесного устройства на оси подвеса, кг	3200
Максимальное давление, МПа	20,0
Объемная подача насоса при номинальной частоте вращения коленчатого вала дизеля, см^3/с	2700,0
Емкость бака гидросистемы, л	25,5

Сконструированная навесная трамбовочная вибрационная плита имеет две независимые гидравлические схемы привода:

1) из двух гидродвигателей возвратно-поступательного движения (силовые гидроцилиндры) для дополнительных секций;

2) из пяти гидромоторов эксцентрических валов.

Выбор гидродвигателей возвратно-поступательного движения (силовые гидроцилиндры) и определение их основных параметров. Основными параметрами, по которым выбираются гидродвигатели возвратно-поступательного движения, являются:

F – номинальное усилие на штоке гидроцилиндра, Н;

L – ход поршня гидроцилиндра, м;

V – скорость движения поршня, исходя из требований выполнения технологического процесса [4, 10, 11].

Конструкторские расчеты показали следующие исходные параметры: $F_м$ = 5000 Н (максимальный вес секции 500 кг), L = 200 мм (с учетом системы рычагов) и V = 0,10 м/с.

По заданному усилию $F_м$ и рабочему давлению $p_{г.ц.расч} \approx (0{,}8–0{,}9)p_{н.ном}$ определяем расчетную эффективную площадь поршня $S_{э.п.р} = F_{с.х.м} / p_{г.ц.расч}$ гидроцилиндра:

$$p_{г.ц.расч} = 0{,}8 \cdot 16{,}0 = 12{,}8 \text{ МПа}; \quad (1)$$

$$S_{п.расч} = 5000 / 12{,}8 = 390{,}6 \text{ мм}^2; \quad (2)$$

$$d_{п.расч} = \sqrt{4 \cdot 390{,}6 / 3{,}14} = 22{,}3 \text{ мм}. \quad (3)$$

По расчетному диаметру поршня $d_{п.расч}$ выбираем гидроцилиндр марки ГЦ-32.16.200.

Площадь поршня равна $S_{э.поршня}$ = 803,8 мм^2, $S_{э.\ штока\ п}$ = 602,0 мм^2.

Для создания заданного усилия на поршне гидроцилиндра определяется необходимое подаваемое давление $\Delta p_{г.ц}$ (МПа) по формуле (4):

$$\Delta p_{г.ц} = \frac{F}{S_{э.п} \cdot \eta_{м.г.ц}} = \frac{5000}{602{,}9 \cdot 0{,}96} = 8{,}64 \text{ МПа}, \quad (4)$$

где $S_{э.п}$ – эффективная площадь поршня, мм^2; $\eta_{м.г.ц.}$ – механический КПД гидроцилиндра.

Полный расход, который необходимо подать для питания параллельно работающих гидроцилиндров, равен

$$Q_{\Sigma г.ц} = Q_{г.ц} \cdot k_{г.ц} = \frac{8{,}04 \cdot 10}{0{,}98} \cdot 2 =$$

$$= 82{,}0 \cdot 2 = 164{,}0 \text{ см}^3/\text{с},$$

где $k_{г.ц}$ – число параллельно работающих гидроцилиндров.

Правильность подбора подтверждается расчетом:

$$\Delta p_{г.ц} = 8{,}64 \text{ МПа} < p_{г.ц.ном} = 16{,}0 \text{ МПа};$$

$$Q_{\sum г.ц} = 164{,}0 \text{ см}^3/\text{с} < Q_н = 2700 \text{ см}^3/\text{с}.$$

Выбор гидромоторов и определение их основных параметров. Для привода пяти эксцентриковых валов используем гидромоторы с заданными параметрами крутящего момента M и частотой вращения n эксцентрикового вала виброплиты.

Принимая во внимание исходные данные вибровала: частота вращения вала n = 30,0 с$^{-1}$, крутящий момент на валу $M_{\ э.вала} \le 20{,}0$ Нм, количество гидромоторов – 5 единиц, из условия для гидромашин вращательного действия по формуле

$$M_{э.вала} \le M_{г.м},\ 20{,}0 \text{ Н·м} \le 21{,}6 \text{ Н·м}, \quad (5)$$

где $M_{э.вала}$ – крутящий момент на валу эксцентрикового вала, Н·м; $M_{г.м}$ – крутящий момент, развиваемый гидромотором, Н·м; выбираем гидромотор ГМШ-10В-3.

Для создания заданного крутящего момента на вибровалу определяется необходимое подаваемое давление $\Delta p_{\text{г.м}}$ (МПа) по формуле

$$\Delta p_{\text{г.м}} = \frac{M_{\text{вала}}}{0{,}159 q_{\text{о.г.м}} \cdot \eta_{\text{м.г.м}}} = \\ = \frac{20}{0{,}159 \cdot 10 \cdot 0{,}84} = 14{,}97 \text{ МПа}, \quad (6)$$

где $M_{\text{вала}}$ – заданный крутящий момент, Н·м; $q_{\text{о.г.м}}$ – рабочий объем гидромотора, см^3/об; $\eta_{\text{м.г.м}}$ – КПД гидромотора (0,8/0,95 = 0,84).

Для обеспечения заданной частоты вращения вибровала на гидромотор необходимо подать расход $Q_{\text{г.м}}$ (см^3/с), который определяется по формуле

$$Q_{\text{г.м}} = \frac{q_{\text{о.г.м}} \cdot \eta_{\text{вала}}}{\eta_{\text{о.г.м}}} = \frac{10 \cdot 30{,}0}{0{,}95} = 315{,}8 \text{ см}^3/\text{с}, \quad (7)$$

где $n_{\text{вала}}$ – частота вращения вибровала плиты, с$^{-1}$; $\eta_{\text{о.г.м}}$ – объемный КПД гидромотора (принимается равным 0,90–0,95).

Полный расход, который необходимо подать для питания параллельно работающих гидромоторов, равен:

$$Q_{\sum \text{г.м}} = Q_{\text{г.м}} \cdot k_{\text{г.м}} = 315{,}8 \cdot 5 = 1579 \text{ см}^3/\text{с}, \quad (8)$$

где $k_{\text{г.м}}$ – число параллельно работающих гидромоторов, 5 единиц.

Принимая во внимание технические характеристики гидросистемы трактора МТЗ-82.1 (Беларус-82.1), где объемная подача насоса при номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания равна 2700,0 см^3/с, данного потока достаточно для привода 5 гидромоторов сконструированной виброплиты.

Заключение. На основе конструкторских и технологических изысканий нами предлагается конструкторская разработка усовершенствованной конструкции навесной трамбовочной вибрационной плиты с шириной рабочей зоны до 4,0 м с возможностью уплотнения внешних частей проезжей части дорог и (или) обочин.

Разработанная усовершенствованная конструкция навесной трамбовочной вибрационной плиты состоит из рамы, к которой крепятся три секции виброплит с эксцентриками, приводимыми в действие гидромоторами. На шарнирах к раме прикреплены две дополнительные аналогичные секции с эксцентриками, приводимые с транспортного положения в рабочее гидроцилиндрами. Навесная трамбовочная вибрационная плита агрегатируется с трактором МТЗ с помощью стандартного навесного устройства.

Эффективность применения виброплиты на лесохозяйственных дорогах и иных дорогах шириной до 4,0 м обусловлена уплотнением всей проезжей части за один проход. Конструкция навесной виброплиты позволяет работать в разных плоскостях, что эффективно при уплотнении внешних частей проезжей части дорог, особенно обочин.

Список литературы

1. Ахо С., Сааренкет Т. Управление водоотводом на дорогах с низкой интенсивностью движения: пояснительная записка-резюме [Электронный ресурс]. Лулео, 2006. URL: http://www.ador.ru/data/files/static/kolarctic-3-12.pdf (дата обращения: 01.02.2020).

2. Рекомендации по текущему ремонту и содержанию лесных автомобильных дорог, согласованные с Министерством лесного хозяйства Республики Беларусь, 14 дек. 2015 г. Минск, 2015. 31 с.

3. Лесные автомобильные дороги: нормы проектирования и правила устройства: ТКП 500-2013 (02080). Введ. 01.03.2014. Минск: Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь, 2013. 87 с.

4. Технология строительства дорог: практикум: учеб. пособие / сост. И. И. Леонович. Минск: БНТУ, 2010. 361 с.

5. Матвейко А. П., Клоков Д. В., Протас П. А. Технология и оборудование лесозаготовительного производства: практикум. Минск: БГТУ, 2005. 160 с.

6. Правила по охране труда при строительстве, реконструкции, ремонте и содержании автомобильных дорог / М-во транспорта и коммуникаций Республики Беларусь; М-во труда и соц. защиты Республики Беларусь. Минск, 2002. 200 с.

7. Дульянов А. В. Капустин М. И. О колеблющейся массе вибрационных машин // Повышение использования машин в строительстве. Л.: ЛИСИ, 1983. С. 10–14.

8. Доценко А. И. Исследование динамики процесса уплотнения грунтов виброударным рабочим органом с кривошипно-шатунным возбудителем колебаний: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.05.04. М., 1974. 23 с.

9. Гидравлика и гидромеханизация сельскохозяйственных процессов: практикум для студентов вузов, обучающимся по агроинженерным специальностям / сост.: В. С. Лахмаков, В. И. Лаптев, Е. В. Плискевич. Минск: БГАТУ, 2008. 294 с.

10. Рубец С. Г., Мажутин Е. И., Пашкевич А. В. Обоснование необходимости использования трапециевидных ножей на роторных косилках // Вестник Полоцкого государственного университета. 2016. № 3 (Серия В). С. 44–50.

11. Исследование эксплуатационного состояния лесных дорог и разработка рекомендаций по их содержанию / М. Т. Насковец [и др.] // Труды БГТУ. 2016. № 2 (184): Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 65–69.

12. Леонович И. И., Оковитый А. Л. Эксплуатация лесных дорог. Минск: Вышэйшая школа, 1972. 448 с.

13. Насковец М. Т. Транспортное освоение лесов Беларуси и компоненты лесотранспорта. Минск: БГТУ, 2009. 170 с.

14. Об утверждении межотраслевых правил по охране труда в лесной, деревообрабатывающей промышленности и в лесном хозяйстве Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь: постановление Министерства труда и социальной защиты Республики Беларусь и Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь от 30 дек. 2008 г. № 211/39 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс]. URL: http://www.pravo.by/pdf/2009-147/2009-147(016-099).pdf (дата обращения: 01.02.2020).

15. Правила противопожарного обустройства лесов Республики Беларусь: ТКП 193-2009 (02080). Минск: Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь, УП «Белгипролес», 2009. 20 с.

References

1. Akho S., Saarenket T. *Upravlenie vodootvodom na dorogakh s nizkoy intensivnost'yu dvizheniya* [Management of drainage on roads with low traffic]. Available at: http://www.ador.ru/data/files/static/kolarctic-3-12.pdf (accessed 01.02.2020).

2. *Recomendatsii po tekushchemu remontu i soderzhaniyu lesnykh avtomobil'nykh dorog, soglasovannye Ministerstvom lesnogo hozyaistva Respubliki Belarus 14 dek. 2015 g.* [Recommendation on current repair and maintenance of forest roads, coordinated by the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus on December 14, 2015]. Minsk, 2015. 31 p.

3. TKP 500-2013 (02080). Forest roads: design standards and rules of the device. Minsk, Ministry of Forestry of the Republic of Belarus Publ., 2013. 87 p.

4. Leonovich I. I. *Tehnologiya stroitel'stva dorog: praktikum* [Road construction technology: a workshop]. Minsk, BNTU Publ., 2010. 361 p.

5. Matveiko A. P., Klokov D. V., Protas P. A. *Tehnologiya i oborudovanie lesozagotovitel'nogo proizvodstva: praktikum* [Technology and timber production equipment: workshop]. Minsk, BGTU Publ., 2005. 160 p.

6. *Pravila po okhrane truda pri stroitel'stve, rekonsruktsii, remonte i soderzhanii avtomobil'nykh dorog* [Rules on labor protection in the construction, reconstruction, repair and maintenance of motorized roads]. Minsk, 2002. 200 p.

7. Dul'aninov A. V., Kapustin M. I. About the oscillating mass of vibrating machines. *Povyshenie ispol'zovaniya mashin v stroitelstve* [Increasing the use of machines in construction]. Leningrad, LISI Publ., 1983, pp. 10–14 (In Russian).

8. Dotsenko A. I. *Issledovanie dinamiki protcessa uplotneniya gruntov vibroudarnym rabochim organom s krivoshipnoshatunnym vozbuditelem kolebaniy*: *avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Study of the dinamics of soil compaction process by a vibro-shock working body with a crank-rod vibration exciter: abstract of thesis PhD (Engineering)]. Moscow, 1974. 23 p.

9. Lakhmakov V. S., Laptev V. I., Pliskevich E. V. *Gidravlika i gidromekhanizatsiya sel'skokhozyaistvennykh protsessov: praktikum dlya studentov vuzov, obuchaushchikhsya po agroinzhenernym special'noctzyam* [Hydraulics and hydromechanization of agricultural processes: a workshop for university students studying agroengineering specialties]. Minsk, BGATU Publ., 2008. 294 p.

10. Rubets S. G., Mazhutin E. I., Pashkevich A. V. Justification of the need to use trapezoidal knives on rotary mowers. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Polotsk State University], 2016, no. 3 (Series B), pp. 44–50 (In Russian).

11. Naskovets M. T. Study of the operational state of forest roads and development of recommendations on their content. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 2 (184): Forest and Woodworking Industry, pp. 65–69 (In Russian).

12. Leonovich I. I., Okovity A. L. *Ekspluatatsiya lesnykh dorog* [Exploitation of forest roads]. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 1972. 448 p.

13. Naskovets M. T. *Transportnoye osvoyeniye lesov Belarusi i komponenty lesotransporta* [Vehicle development of Belarus forests and components of forest transport]. Minsk, BGTU Publ., 2009. 170 p.

14. *Ob utverzhdenii mezhotraslevykh pravil po okhrane truda v lesnoy, derevoobrabatyvaushchey promyshlennosti v lesnom khozyaistve Ministerstva lesnogo khozyaistva Respubliki Belarus* [About the approval of intersectoral rules on labor protection in the wood, woodworking industry and in forestry of the Ministry of forestry of Republic of Belarus]. Resolution No. 211/39 of the Ministry of Labour and Social Protection of the Republic of Belarus and the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus of 30 December 2008. Available at: http://www.pravo.by/pdf/2009-147/2009-147 (016-099).pdf (accessed date 01.02.2020).

15. TKP 193-2009 (02080). Rules of fire-prevention arrangement of forests of the Republic of Belarus. Minsk, Ministry of Forestry of the Republic of Belarus Publ., 2009. 20 p.

Информация об авторах

Хорошун Николай Владимирович – магистр экономических наук, магистр технических наук, доцент кафедры организации производства и экономики недвижимости. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). Начальник отдела промышленного производства. Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь (220048, г. Минск, ул. Мясникова, 39, Республика Беларусь). E-mail: kharashun@ministry.mlh.by

Насковец Михаил Трофимович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: naskovets@belstu.by

Information about the authors

Khoroshun Nikolay Vladimirovich – Master of Economics, Master of Engineering, Assistant Professor, the Department of Production Organization and Real Estate Management. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). Head of the Industrial Engineering Division. Ministry of Forestry of the Republic of Belarus (39, Myasnikova str., 220048, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kharashun@ministry.mlh.by

Naskovets Mikhail Trofimovich – PhD (Engineering), Asociate Professor, Professor of the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: naskovets@belstu.by

Поступила 04.03.2020

УДК 630*2:502.174

П. А. Протас, А. О. Шошин, Ю. И. Мисуно
Белорусский государственный технологический университет

СПЕЦИФИКА РАЗРАБОТКИ ВЕТРОВАЛЬНО-БУРЕЛОМНЫХ ЛЕСОСЕК НА ЗАБОЛОЧЕННЫХ УЧАСТКАХ ЛЕСНОГО ФОНДА

В Беларуси, как и в Европе, наблюдается тенденция к увеличению количества и интенсивности стихийных бедствий в лесах. Наибольшую опасность представляют сильные штормовые ветры, которые могут привести к значительным экономическим, экологическим и социальным негативным последствиям для лесного хозяйства. Существенный урон лесам Беларуси был нанесен ураганными ветрами в июле 2016 г., который стал самым масштабным за последние 18 лет. В результате было повреждено около 6 млн м^3 древесины.

Разработка ветровально-буреломных лесосек имеет свою специфику. Такие лесосеки характеризуются небезопасными и сложными природно-производственными условиями. Ликвидация последствий и очистка поврежденных лесных территорий должна проводится в короткие сроки, чтобы предотвратить возникновение очагов вредителей и болезней, а также снижение качества заготавливаемой древесины. Все вышеперечисленное приводит к увеличению материальных и трудовых затрат при разработке лесосек. Кроме того, зачастую ветровально-буреломные лесосеки находятся на участках с низкой несущей способностью грунтов, что еще больше снижает эффективность их освоения и может привести к негативным экологическим последствиям.

В данной статье проведена оценка производственных условий и особенностей освоения ветровально-буреломных лесосек на заболоченных участках. В результате были разработаны практические рекомендации и предложения по освоению ветровально-буреломных участков лесного фонда с целью создания эффективных и безопасных условий работ и минимизации негативного воздействия лесозаготовок на лесные почвогрунты заболоченных участков. Данные рекомендации были внедрены в производство и показали свою эффективность.

Ключевые слова: ветровально-буреломная лесосека, лесные почвогрунты, заболоченность, рекомендации, эффективность.

P. A. Protas, A. O. Shoshyn, Yu. I. Misuno
Belarusian State Technological University

THE SPECIFICS OF THE WORKING OUT OF WINDFALL-WINDBREAK AREAS ON THE SWAMPY SITES OF THE FOREST FUND

In Belarus, as in Europe, there is a tendency to increase the number and intensity of natural disasters in forests. Strong storms present the greatest danger, which can lead to significant economic, environmental and social negative consequences for forestry. Significant damage to the forests of Belarus was caused by hurricane winds in 2016, which became the largest in the last 18 years. As a result, about 6 million m^3 of wood was damaged.

The development of windfall and windbreak areas has its own specifics. Such cutting areas are characterized by unsafe and difficult natural-production conditions. The elimination of consequences and the cleaning of damaged forest areas should be carried out in a short time to prevent the occurrence of foci of pests and diseases, as well as a decrease in the quality of harvested wood. All of the above leads to an increase in material and labor costs in the development of cutting areas. In addition, often windfall and windbreak areas are located in areas with low bearing capacity of soils, which further reduces the efficiency of their development and can lead to negative environmental consequences.

This article assesses the production conditions and features of the development of windfall-windbreak cutting areas on the swampy sites. As a result, practical recommendations and suggestions were developed for the development of windfall and windbreak areas in order to create effective and safe working conditions and minimize the negative impact of logging on forest soils of swampy sites. These recommendations have been introduced into production and have shown their effectiveness.

Key words: windfall-windbreak cutting area, forest soils, swampiness, recommendations, efficiency.

Введение. Ввиду изменения климата в Беларуси, как и в Европе, наблюдается тенденция к увеличению количества и интенсивности стихийных бедствий в лесах. Соответственно, это приводит к увеличению уровня наносимого ими ущерба.

Одним из наиболее масштабных и внезапных стихийных бедствий являются ветровалы и буреломы [1, 2]. Ветровалами в республике, начиная с 2005 г., ежегодно повреждалось от 500 до 2300 тыс. м^3 древесины. Произошедший в 2016 г. ураган стал для Беларуси самым масштабным за последние 18 лет. В той или иной степени были повреждены насаждения практически во всех лесхозах. Основной удар стихии пришелся на лесные площади ГЛХУ «Смолевичский лесхоз» и ГЛХУ «Червенский лесхоз» (таблица). Объем поврежденной древесины в республике составил около 6 млн м^3, или около 25% ежегодного объема заготавливаемой древесины.

В целях своевременной ликвидации последствий стихийного бедствия, недопущения ухудшения качества древесины, лесовосстановления поврежденных участков необходимо в короткие сроки выполнять существенные объемы заготовки древесины в сложных эксплуатационных условиях. При этом разработка ветровальных лесосек, как правило, требует увеличения затрат за счет уменьшения норм выработки от 20 до 50%, что соответственно повышает расходы на оплату труда и содержание машин и механизмов; увеличения нормы расхода топлива до 10%; дополнительных расходов (командировочные и прочие расходы, связанные с доставкой людей и техники, размещением и проживанием работников).

Дополнительным сдерживающим фактором, усложняющим технологию лесосечных работ и снижающим эффективность разработки лесосек, является низкая несущая способность грунтов. Однако, учитывая существенную заболоченность лесного фонда страны, во многих случаях ветровально-буреломные лесосеки находятся на участках с низкой несущей способностью грунтов. Эффективное освоение таких участков требует учета специфики их разработки.

Целью исследований являлась разработка практических рекомендаций для повышения освоения ветровально-буреломных лесосек на заболоченных участках лесного фонда путем анализа специфики работы в данных условиях на примере действующего производства.

Основная часть. С целью выполнения анализа и разработки рекомендаций по освоению ветровально-буреломных лесосек на грунтах с низкой несущей способностью при ликвидации ветровалов 2016 г. проводились натурные обследования таких участков в 55 квартале Рованичского лесничества ГЛХУ «Червенский лесхоз». Большинство участков располагались на почвах III и IV типов местности с повышенным увлажнением. На основании выполненного анализа и проведенных исследований в области эксплуатационно-экологической совместимости движителей лесных машин с почвогрунтами [3–8] разработаны рекомендации по обеспечению освоения ветровально-буреломных лесосек на грунтах с низкой несущей способностью.

Для своевременной ликвидации последствий стихийного бедствия в наиболее пострадавших лесхозах (ГЛХУ «Смолевичский лесхоз», ГЛХУ «Червенский лесхоз») в Министерстве лесного хозяйства было принято решение мобилизовать все лесхозы отрасли, а также привлечь организации республики всех форм собственности. При этом для каждого лесхоза были определены участки для разработки и сроки их освоения. Анализ эксплуатационных условий и изучение процесса разработки лесосек показали, что в целом применялись рациональная технология и системы машин. Для сокращения сроков ликвидации последствий стихийного бедствия и снижения травмоопасности выполняемых работ максимально использовалась многооперационная техника.

Объем поврежденной древесины и площадь поврежденной покрытой лесом территории в наиболее пострадавших лесхозах в результате ветровала 2016 г.

Название лесхоза	Объем поврежденной древесины, тыс. м^3	Площадь поврежденной территории леса, га	Удельный вес поврежденной территории от площади покрытых лесом территорий, %
ГЛХУ «Смолевичский лесхоз»	1720,0	8796	23,0
ГЛХУ «Червенский лесхоз»	1589,3	11 955	16,3
ГОЛХУ «Мозырский опытный лесхоз»	231,3	3133	3,6
ГОЛХУ «Стародорожский опытный лесхоз»	220,1	6601	10,2
ГЛХУ «Березинский лесхоз»	134,0	2680	2,8
ГЛХУ «Белыничский лесхоз»	104,0	1713	1,8

Учитывая специфику разработки ветровально-буреломных лесосек на заболоченных участках, для повышения эффективности их освоения даны следующие предложения и рекомендации:

– при значительных объемах повреждения насаждений заболоченные участки должны разрабатываться в зимний период или в летние месяцы с минимальным количеством осадков; в остальное время будут разрабатываться участки с хорошей несущей способностью грунтов;

– на большинстве участков III и IV типов местности может применяться система машин «бензопила – трелевочный трактор с канатно-чокерной оснасткой»; на участках II типа местности с повышенным увлажнением и, частично, III типа местности может применяться система машин «харвестер – форвардер». При этом требуется с практической апробацией применять харвестер с колесной формулой 6К6 (например Амкодор 2551) или более легкий с колесной формулой 4К4 (Амкодор 2541);

– разработку лесосеки харвестером необходимо начинать со стороны направления ветровала; ширина пасек и, соответственно, расстояние между волоками должны быть 15–16 м, а их направление перпендикулярно повалу или под углом 45–50° к основному направлению повала или изгиба поврежденных деревьев; волоки должны прокладываться криволинейно с учетом выворотов, низин, а также направления повала;

– ввиду значительной заболоченности оператор харвестера должен укреплять волок, армируя его не только лесосечными отходами, но также и низкокачественной, тонкомерной древесиной; армирование волоков также необходимо осуществлять путем подвозки лесосечных отходов форвардерами с более повышенных участков местности;

– для снижения давления движителя харвестера и форвардера на опорное основание следует снижать внутреннее давление воздуха в шинах до минимально допустимых значений; для повышения проходимости форвардеров они могут оснащаться съемными гусеницами, устанавливаемыми на тандемы; с целью уменьшения давления движителя форвардера на почвогрунт его загрузка при необходимости может снижаться до 60–70%;

– учитывая климатические особенности Беларуси (короткий период с отрицательными температурами), необходимо обеспечить максимальную концентрацию техники, преимущественно харвестеров, с опытными операторами и полноценное обеспечение машин расходными материалами (шланги, шины, заточенные цепи, масло, топливо, освещение). Так как если этот период будет упущен, освоить заболоченный участок в более поздние сроки не представляется возможным; при этом, обеспечивая доставку новых комплексов, следует привлекать к работе только опытных операторов, а необходимое количество комплексов определять с учетом их беспрепятственной работы друг для друга; необходимо как можно дольше продолжать работу тем операторам, которые уже имеют опыт освоения данного участка с возможностью их материального стимулирования; перед началом работ новых операторов необходимо проинструктировать не только по вопросам охраны труда, но и технологическим особенностям работы (показать на практике и поделиться опытом уже работающих операторов);

– чтобы минимизировать переезды между пасеками, выделять для одного комплекса участок для его 2-недельной работы (около 2 га); технологическое распределение машин по осваиваемой территории позволит значительно сократить площади, которые нужно оставить до сухого лета;

– необходимо также быть готовыми к возможным провалам машин, поэтому должна быть техника для их буксировки (например, гусеничный трактор);

– наиболее заболоченные участки не рационально осваивать с экологической и экономической точек зрения (это можно конкретизировать по факту заготовки экономическими показателями), и их можно выделять в отдельные участки (не эксплуатационные).

Заключение. В процессе исследований было установлено, что разработка ветровально-буреломных лесосек имеет свою специфику. Такие лесосеки характеризуются небезопасными и сложными эксплуатационными условиями. Ликвидация последствий и очистка поврежденных лесных территорий должна проводится в короткие сроки, чтобы предотвратить возникновение очагов вредителей и болезней, а также снижение качества заготавливаемой древесины. Все выше перечисленное приводит к увеличению материальных и трудовых затрат при разработке лесосек. Кроме того, зачастую ветровально-буреломные лесосеки находятся на участках с низкой несущей способностью грунтов, что еще больше снижает эффективность их освоения и может привести к негативным экологическим последствиям.

Разработка ветровально-буреломных лесосек на заболоченных участках лесного фонда усложняет технологический процесс ввиду необходимости проведения дополнительных мероприятий: армирования трелевочных

волоков отходами лесозаготовок; разбивки лесосеки на пасеки и прокладки криволинейных волоков с учетом пониженных заболоченных участков; регулировки давления в шинах; установки гусениц на тандемные тележки и др. При этом снижается проходимость и производительность машин и возрастают удельные затраты на заготовку древесного сырья.

Разработанные на основании выполненных исследований практические рекомендации были внедрены и использованы в производственном процессе лесозаготовок при освоении ветровально-буреломных лесосек на заболоченных участках лесфонда в ГЛХУ «Червенский лесхоз». При внедрении были достигнуты следующие основные результаты:

– более полное освоение труднодоступных участков лесфонда в соответствии с установленными сроками ликвидации последствий стихии;

– улучшение организации производственного процесса лесосечных работ;

– повышение степени безопасности при выполнении операций;

– более полная загрузка машин и механизмов;

– снижение воздействия лесозаготовительных машин на лесные экосистемы.

Приведенные рекомендации могут также применяться для разработки технологической документации и рационального выбора технологий освоения ветровально-буреломных лесосек на заболоченных участках лесного фонда.

Список литературы

1. Протас П. А., Завойских Г. И., Федоренчик А. С. Классификация ветровально-буреломных лесосек с учетом эксплуатационных особенностей их освоения // Труды БГТУ. 2013. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 51–52.

2. Состояние ветровально-буреломного лесфонда в Республике Беларусь и проблемы его освоения / П. А. Протас [и др.] // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 55–57.

3. Протас П. А., Мисуно Ю. И. Структурная схема и критерии оценки эксплуатационно-экологической совместимости лесных машин с почвогрунтами // Труды БГТУ. 2016. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 248–253.

4. Solgi A., Najafi A. The impacts of ground-based logging equipment on forest soil // Journal of forest science. 2014. No. 60 (1). P. 28–34.

5. Damage to soil and residual trees caused by different logging systems applied to late thinning / A. Cudzik [at al.] // Croatian Journal of Forest Engineering. 2017. No. 38 (1). P. 83–95.

6. The impact of heavy traffic on forest soils: a review / M. Cambi [at al.] // Forest ecology and management. 2015. No. 338. P. 124–138.

7. Дручинин Д. Ю. Повреждение лесной почвенно-растительной среды при проведении лесозаготовительных работ // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 26–28 апр. 2017 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. Минск, 2017. С. 84–87.

8. Воздействие лесозаготовительной техники на лесную среду / Ю. Ю. Герасимов [и др.] // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2008. № 21–3. С. 186–188.

References

1. Protas P. A., Zavoyskikh G. I., Fedorenchik A. S. Classification of windbreak and windbreak areas, taking into account the operational features of their development. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 51–52 (In Russian).

2. Protas P. A., Fedorenchik A. S., Lednickiy A. V., Zavoyskikh G. I. The state of the wind-windbreak forest fund in the Republic of Belarus and the problems of its development. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 55–57 (In Russian).

3. Protas P. A., Misuno Yu. I. Structural scheme and criteria for assessing the operational and environmental compatibility of forest machines with soil. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 248–253 (In Russian).

4. Solgi A., Najafi A. The impacts of ground-based logging equipment on forest soil. *Journal of Forest Science*, 2014, no. 60 (1), pp. 28–34.

5. Cudzik A., Brennenstuhl M., Białczyk W., Czarnecki Ja. Damage to soil and residual trees caused by different logging systems applied to late thinning. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2017, no. 38 (1), pp. 83–95.

6. Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. The impact of heavy traffic on forest soils: a review. *Forest ecology and management*, 2015, no. 338, pp. 124–138.

7. Druchinin D. Yu. Damage the forest soil and plant environment at carrying out forest harvesting operations. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Lesozagotovitel'noye proizvodstvo:*

problemy i resheniya" [Materials of International scientific-technical conference "Logging industry: problems and solutions"]. Minsk, 2017, pp. 84–87 (In Russian).

8. Gerasimov Yu. Yu., Karvinen S., Syunev V. S., Katarov V. K. The impact of forestry equipment on the forest environment. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2008, no. 21–3, pp. 186–188 (In Russian).

Информация об авторах

Протас Павел Александрович − кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: protas77@rambler.ru

Шошин Артем Олегович – ассистент кафедры механики и конструирования. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: raul777gol@mail.ru

Мисуно Юлия Игоревна – аспирант кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: julia.misuno@yandex.ru

Information about the authors

Protas Pavel Alexandrovich − PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: protas77 @rambler.ru

Shoshyn Artsiom Olegovich – Assistant Lecturer, the Department of Mechanics and Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: raul777gol@mail.ru

Misuno Yuliya Igorevna – PhD student, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: julia.misuno@yandex.ru

Поступила 25.03.2020

УДК 630*83:674.8

Е. А. Леонов[1], Д. В. Клоков[2], А. А. Гарабажиу[1], А. А. Духовник[1]
[1]Белорусский государственный технологический университет
[2]Белорусский национальный технический университет

ВЛИЯНИЕ СРОКОВ ХРАНЕНИЯ ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ И ТОПЛИВНОЙ ЩЕПЫ НА ИХ ТЕПЛОТВОРНУЮ СПОСОБНОСТЬ

В статье рассмотрены актуальные вопросы хранения древесного топлива из низкокачественной древесины и отходов в условиях лесоэнергетических терминалов мини-ТЭЦ деревообрабатывающих предприятий Республики Беларусь. Особенностью данных энергетических объектов является выработка тепловой энергии на собственные технологические нужды, а также равномерный в течение года спрос на топливную щепу. Разработана технологическая схема производства топливной щепы на терминалах мини-ТЭЦ деревообрабатывающих предприятий. Ее особенностью является совместное размещение на территории терминала штабелей неизмельченного дровяного долготья и огороженного бурта для топливной щепы и отходов деревообрабатывающего производства (кусковые древесные отходы, опилки, отсев и т. д.). Влажность оказывает существенное влияние на качество и энергетические свойства древесного топлива. Предложена методика исследования изменения влажности и потерь древесины при хранении различных видов древесного топлива (щепа различного качества, опилки и кора) у потребителей. Проведен анализ существующих способов хранения древесины. Их достоинства и недостатки уточняются. На основании предварительных исследований сформулированы несколько выводов. С целью повышения теплотворной способности сжигаемого древесного сырья даны рекомендации по обустройству площадки терминала, особенностям складирования хранения древесины. Проведенные экспериментальные исследования открытого кучевого хранения некоторых видов вторичных ресурсов и топливной щепы позволили обосновать рациональные сроки их хранения, обеспечивающие оптимальную теплотворную способность и минимальные потери древесного вещества.

Ключевые слова: отходы, щепа, влажность, потери, хранение, теплотворная способность.

E. A. Leonov[1], D. V. Klokov[2], A. A. Garabazhiu[1], A. A. Dukhovnik[1]
[1]Belarusian State Technological University
[2]Belarusian National Technical University

INFLUENCE OF THE WOOD RAW MATERIALS AND FUEL CHIPS STORAGE TERMS ON THEIR HEATING ABILITY

The article discusses current issues of wood fuel storage from low-quality wood and residues in the conditions of mini-CHP forest-energy terminals of woodworking enterprises of the Republic of Belarus. A feature of these energy facilities is the generation of thermal energy for their own technological needs, as well as the uniform demand for fuel chips throughout the year. The technological scheme of fuel chips production at the terminals of mini-CHP of woodworking enterprises has been developed. Its peculiarity is the joint placement in the terminal area of stacks of not crushed wood longest and fenced collar for fuel chips and waste woodworking production (lumpy wood waste, sawdust, screenings, etc.). Moisture renders significant influence on quality and power properties of wood fuel. The research technique of a moisture and wood losses change during storage of various kinds of wood fuel (chips of various quality, sawdust and a bark) at consumers is offered. The analysis of existing methods of storage of wood is carried out. Their merits and demerits are specified. On the basis of preliminary researches are formulated a several of conclusions. In order to increase the calorific value of the burned wood raw material, recommendations are given on the arrangement of the terminal site and on the specifics of storing wood storage. The experimental studies of the open cumulus storage of certain types of secondary resources and fuel chips allowed substantiating rational storage periods that provide optimal calorific value and minimal loss of wood substance.

Key words: residues, wood chips, moisture, losses, storage, calorific value.

Введение. В целях импортозамещения традиционных видов топлива (природного газа, мазута и т. д.), а также утилизации древесных отходов лесного комплекса на ряде предприятий производство тепловой и электрической энергии осуществляется из различных видов древесной биомассы. На сегодняшний день в стране выработка «зеленой» энергии

осуществляется на 20 мини-ТЭЦ мощностью от 1,2 до 18 МВт, а также на более чем 3000 котельных мощностью от 0,012 до 20 МВт [1–4].

Применительно к лесному комплексу на предприятиях Холдинга организаций деревообрабатывающей промышленности функционирует ряд отраслевых мини-ТЭЦ, особенностью которых является получение энергии для собственных технологических нужд (сушильное хозяйство, плитное производство и т. д.) за счет сжигания древесных отходов, образующихся в процессе основной производственной деятельности [5, 6].

Производственный опыт работы данных энергообъектов подразумевает создание в непосредственной близости от мини-ТЭЦ производственного участка (лесоэнергетического терминала) для складирования, временного хранения, подготовки к сжиганию и измельчения дровяной древесины и древесных отходов. При этом площадка терминала должна иметь асфальтовое или бетонное покрытие на достаточно прочном основании, препятствующее продавливанию почвы и образованию колеи при работе рубильной машины и погрузчика, а продольная ось штабелей (буртов), по возможности, должна быть направлена в сторону естественного стока ливневых вод. Уклон покрытия площадки в поперечном направлении в обе стороны от продольной оси штабеля (бурта) следует делать 8–10%, вдоль бурта в сторону стока – 1,5–2% (рис. 1) [5, 6].

В процессе открытого кучевого хранения древесного топлива, с одной стороны, происходит его атмосферная сушка и повышается теплотворная способность, а с другой – происходит естественная биологическая деструкция, приводящая к потерям древесного вещества. В этой связи вопросы оптимизации сроков хранения топливной древесины, обеспечивающие эффективное ее сжигание при минимальных потерях, являются весьма актуальными [7, 8].

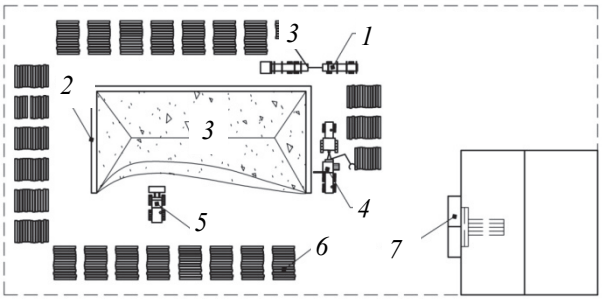


Рис. 1. Технологическая схема функционирования лесоэнергетических терминалов мини-ТЭЦ деревообрабатывающих предприятий:
1 – сортиментовоз; *2* – сплошной забор, загораживающий измельченное древесное топливо; *3* – бурт щепы и отходов производства (кусковых и мягких); *4* – передвижная рубильная машина; *5* – ковшовый лесопогрузчик; *6* – штабели дровяного долготья; *7* – расходные топливные бункеры котлов мини-ТЭЦ

Основная часть. С целью исследования изменений размерно-качественных характеристик вторичного древесного сырья и топливной щепы, влияющих на их теплотворную способность, в условиях сертифицированной ЦЗЛ ОАО «Витебскдрев» был проведен ряд натурных экспериментов [7, 8, 9].

Объектами исследований являлись следующие виды щепы и вторичного древесного сырья: технологическая щепа хвойных пород; топливная щепа из дровяной древесины; топливная щепа из отходов лесозаготовок; опилки хвойных пород; кора хвойных пород.

Характеристика исследуемых видов энергетического сырья приведена в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Фракционный состав принятых к исследованию видов щепы, % (определен по ГОСТ 15815–83)

Массовая доля, %	Технологическая щепа из деловой древесины (хвойная)	Топливная щепа (лиственная)	
		из дровяной древесины	из отходов лесозаготовок
Кора и гниль	0	9,0	38,0
Остатки на ситах с отверстиями диаметром:			
30 мм	19,5	5,0	3,2
20 и 10 мм	75,0	65,9	75,8
5 мм	5,0	24,2	16,1
Остатков на поддоне	0,5	4,9	4,9
Итого	100,0	100,0	100,0

Таблица 2

Насыпная плотность принятых к исследованию видов древесного топлива, кг/м³ (определен по ГОСТ 16362–86)

Технологическая щепа из деловой древесины (хвойная)	Топливная щепа (лиственная)		Опилки хвойные	Кора хвойная
	из дровяной древесины	из отходов лесозаготовок		
310	255	255	230	320

В процессе открытого хранения в кучах измельченного древесного топлива наблюдалось перераспределение влаги и образование двух слоев: внутреннего и наружного. При этом осуществлялось подсыхание внутреннего (основного) слоя и увеличение влажности наружного (20–40 см) слоя. При отсутствии процесса саморазогревания влажность внутреннего слоя практически не менялась (биотопливо медленно подсыхало), а влажность наружного зависела от метеорологических условий [10, 11].

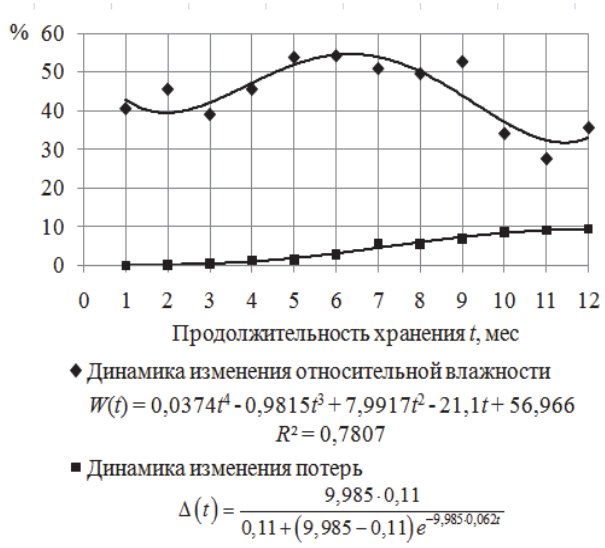
На рис. 2 представлены выборочные результаты динамики изменения относительной влажности (внутреннего слоя) исследованных видов древесного топлива при длительном открытом кучевом хранении [10, 11].

Установлено, что из исследуемых видов топлива при кучевом хранении наименьшей относительной влажностью, имеющей устойчивую тенденцию к снижению, обладают неизмельченные сучья и ветви (рис. 2, *б*). Это указывает на большую целесообразность их хранения в неизмельченном виде, чем хранение полученной из них топливной щепы.

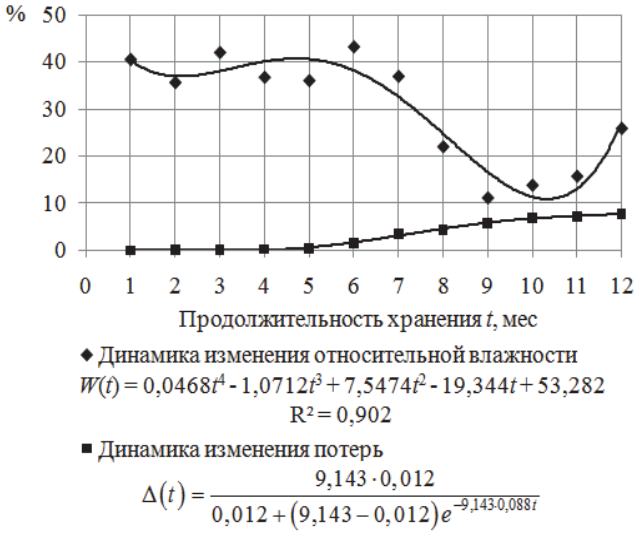
Относительная влажность внутреннего слоя щепы, полученной из дровяной древесины, при длительном хранении в весенне-летний период имеет тенденцию к возрастанию до 60%. При хранении топливной щепы из лесосечных отходов в летний период, наоборот, наблюдается снижение ее относительной влажности до 40% (рис. 2, *а*).

По результатам исследований установлено, что длительное открытое кучевое хранение щепы из стволовой части дерева, коры и опилок более целесообразно (с точки зрения подсушивания и роста теплотворной способности) под навесом или укрытием из различных водонепроницаемых материалов в виде полиэтиленовой пленки, брезента и др.

В процессе длительного открытого кучевого хранения древесного топлива неизбежны потери древесного вещества (биомассы). Уменьшение объемного веса топливного сырья связано с уменьшением содержания древесных смол, процессами гниения и образованием свободной уксусной кислоты, которая частично улетучивается [11]. Величина среднемесячных потерь зависит от срока хранения, сезона и вида складируемой биомассы.



а



б

Рис. 2. Исследование открытого кучевого хранения энергетического древесного сырья: *а* – щепа из отходов лесозаготовок; *б* – неизмельченные сучья и ветви

Установлено, что величина потерь древесного вещества в исследуемых видах топлива описывается логистической функцией

$$\Delta(t) = \frac{Ay_0}{y_0 + (A - y_0)e^{-Abt}}, \quad (1)$$

где A – асимптота функции; y_0 – начальное значение функции Δ; b – коэффициент, зависящий от вида топлива; t – продолжительность хранения древесного топлива в месяцах.

На рис. 2 и в табл. 3 представлены выборочные результаты исследований потерь древесного вещества при открытом способе хранения некоторых видов древесного топлива.

Проведенные исследования показали, что процессы, приводящие к потерям древесного топлива при хранении, проходят в три стадии. На первой стадии, продолжительностью 5–6 месяцев, топливо хранится стабильно, потеря массы не превышает 1%. На второй стадии происходит рост потерь с различной степенью интенсивности. На третьей стадии нарастание потерь, как правило, существенно замедляется. При этом процесс разрушения измельченного древесного топлива происходит более интенсивно, чем у неизмельченного.

Из рассмотренных видов древесного топлива кора наиболее подвержена процессам деструкции, поэтому требует минимальных сроков хранения и первоочередного использования (сжигания).

При хранении древесного топлива в кучах (валах) в результате физических, химических и микробиологических процессов происходит уменьшение объемного веса щепы. При этом потери объемного веса биомассы в среднем составляют 0,8–1,5% в месяц [8, 11–14].

Проведенные экспериментальные исследования позволяют произвести теоретический расчет изменения динамики теплотворной способности (низшей теплоты сгорания) основных видов щепы и вторичного древесного сырья в зависимости от продолжительности их открытого кучевого хранения:

$$Q_{\text{н}} = 18{,}9 - 0{,}214W(t) - 0{,}189A^{\text{р}} - \frac{\Delta(t)}{100}, \quad (2)$$

где 18,9 – теплота сгорания 1 кг абсолютно сухого древесного вещества, МДж/кг; $W(t)$ – функция изменения влажности древесного топлива от продолжительности открытого кучевого хранения, %; $A^{\text{р}}$ – зольность древесного топлива, %; $\Delta(t)$ – логистическая функция потерь древесного вещества при длительном открытом кучевом хранении, %.

На рис. 3 приведены выборочные результаты теоретических исследований влияния сроков открытого кучевого хранения на величину теплотворной способности топливной щепы и некоторых видов вторичного древесного сырья.

Рис. 3. Влияние продолжительности хранения основных видов древесного топлива на величину их низшей теплоты сгорания

Из графиков рис. 3 видно, что наибольшей теплотворной способностью обладают неизмельченные отходы лесозаготовок (сучья и ветви), которые наряду с опилками хвойных пород отличаются высокой устойчивостью к длительному открытому кучевому хранению, проявляемой в незначительном по отношению к щепе из отходов лесозаготовок изменении низшей теплоты сгорания.

Таблица 3

Значения параметров логистической функции для потерь различных видов древесного топлива при открытом способе хранения

Вид древесного топлива	Слой при хранении	Значения параметров			Критерий $F_{\text{р}}$
		A, %	b, 1/мес.	y_0, %	
Щепа лиственных пород из отходов лесозаготовок	Наружный	9,841	0,069	0,070	1,039
	Внутренний	9,985	0,062	0,110	1,046
Сучья и ветви	Наружный	8,829	0,134	0,011	1,044
	Внутренний	9,143	0,088	0,012	1,009
Опилки хвойных пород	Наружный	7,588	0,141	0,005	1,006
	Внутренний	7,499	0,141	0,005	1,000

Рекомендуемые сроки хранения сучьев, ветвей и опилок хвойных пород при их атмосферной сушке не должны превышать 3,5–4 месяца, в то время как для топливной щепы из отходов лесозаготовок данный показатель составляет 1,5–2,5 месяца.

Заключение. Для снижения расхода древесного топлива при выработке единицы энергии котельными или мини-ТЭЦ рекомендуется:

– в целях уменьшения древесных потерь и лучшего подсушивания межсезонный запас древесного топлива формировать преимущественно из неизмельченной древесины; топливную щепу на складе хранить только в качестве страховых, межоперационных или неснижаемых запасов, которые периодически необходимо обновлять; минимальные сроки хранения и первоочередное сжигание древесной коры;

– в целях эффективного сжигания топливного сырья сроки хранения неизмельченных сучьев, ветвей и опилок не должны превышать 3,5–4 месяца; оптимальные сроки хранения топливной щепы находятся в диапазоне 1,5–2,5 месяца.

Список литературы

1. Клоков Д. В., Турлай И. В., Леонов Е. А. Оборудование лесопромышленных предприятий. Лабораторный практикум. Минск: БГТУ, 2015. 200 с.

2. Технология и оборудование комплексного использования древесного сырья. Практикум / А. С. Федоренчик [и др.]. Минск: БГТУ, 2014. 274 с.

3. Федоренчик А. С., Клоков Д. В., Леонов Е. А. Энергетическое использование древесной биомассы. Практикум. Минск: БГТУ, 2015. 212 с.

4. Федоренчик А. С., Клоков Д. В., Леонов Е. А. Технология и оборудование лесосечных и лесоскладских работ. Минск: БГТУ, 2016. 204 с.

5. Леонов Е. А., Клоков Д. В. Оптимизация запасов сырья в условиях круглогодового спроса на щепу // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2019. № 1 (216). С. 89–94.

6. Леонов Е. А., Клоков Д. В. Производство топливной щепы на лесоэнергетических терминалах деревообрабатывающих предприятий // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2019. № 1 (216). С. 95–99.

7. Леонов Е. А., Федоренчик А. С. Оптимизация вместимости склада межсезонного хранения древесного топлива // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды III Междунар. евразийского симпоз. Воронеж, 2008. С. 62–66.

8. Леонов Е. А. Исследование хранения древесного топлива у потребителей // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообр. пром-сть. 2009. Вып. XVII. С. 89–93.

9. Леонов Е. А., Федоренчик А. С. Имитационное моделирование устойчивого функционирования склада древесного топлива // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообр. пром-сть. С. 58–61.

10. Федоренчик А. С., Леонов Е. А. Лесоэнергетические терминалы: оптимизация параметров // Лесное и охотничье хоз-во. 2012. № 9. С. 10–15.

11. Кулак М. И., Федоренчик А. С, Леонов Е. А. Прогнозирование хранения запасов топлива в условиях лесоэнергетических терминалов // Наука и инновации. 2012. № 7. С. 69–72.

12. Федоренчик А. С., Леонов Е. А. Обеспечение устойчивого снабжения энергообъектов древесным топливом с созданием минимально необходимых запасов // Лесной вестник. 2014. № S2. С. 146–150.

13. Леонов Е. А. Игнатенко В. В., Клоков Д. В. Математическая модель работы рубильной машины с учетом ее технических отказов // Труды БГТУ. 2016. № 2: Лесная и деревообр. пром-сть. С. 40–44.

14. Леонов Е. А. Устойчивое снабжение энергообъектов древесным топливом с созданием минимально необходимых запасов // Труды БГТУ. 2014. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 17–19.

References

1. Klokov D. V., Turlay I. V., Leonov E. A. *Oborudovaniye lesopromyshlennykh predpriyatiy. Laboratornyy praktikum* [Equipment timber companies. Laboratory practicum]. Minsk, BGTU Publ., 2015. 200 p.

2. Fedorenchik A. S., Mokhov S. P., Klokov D. V., Leonov E. A. *Tekhnologiya i oborudovaniye kompleksnogo ispol'zovaniya drevesnogo syr'ya. Praktikum* [Technology and equipment for the integrated use of wood raw material. Practical work]. Minsk, BGTU Publ., 2014. 274 p.

3. Fedorenchik A. S., Klokov D. V., Leonov E. A. *Energeticheskoye ispol'zovaniye drevesnoy biomassy. Praktikum* [Energy use of wood biomass. Practical work]. Minsk, BGTU Publ., 2015. 212 p.

4. Fedorenchik A. S., Klokov D. V., Leonov E. A. *Tekhnologiya i oborudovaniye lesosechnykh i lesoskladskikh rabot* [Technology and equipment for logging and timber works]. Minsk, BGTU Publ., 2016. 204 p.

5. Leonov E. A., Klokov D. V. Optimization of raw material reserves in the conditions of the year-round demand for the wood chips. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2019, no. 1 (216), pp. 89–94 (In Russian).

6. Leonov E. A., Klokov D. V. Fuel chips production at the wood-energy terminals of wood processing enterprises. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2019, no. 1 (216), pp. 95–99 (In Russian).

7. Leonov E. A., Fedorenchik A. S. Optimization of the storage capacity of the off-season storage of wood fuel. *Derevoobrabotka: tekhnologii, oborudovaniye, menedzhment XXI veka: trudy III Mezhdunar. evraziyskogo simpoziuma* [Woodworking: technologies, equipment, management of the XXI of century: Proceedings of III International The Eurasian Symposium], Voronezh, 2008, pp. 62–66 (In Russian).

8. Leonov E. A. Research of storage of wood fuel from consumers. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 2, Forest and Woodworking Industry, 2009, issue 17, pp. 89–93 (In Russian).

9. Leonov E. A., Fedorenchik A. S. Simulation modeling of sustainable functioning of wood fuel storage. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 58–61 (In Russian).

10. Fedorenchik A. S., Leonov E. A. Forest energy terminals: optimization of parameters. *Lesnoye i okhotnich'ye khozyaystvo* [Forestry and hunting], 2012, no. 9, pp. 10–15 (In Russian).

11. Kulak M. I., Fedorenchik A. S., Leonov E. A. Forecasting the storage of fuel reserves in the context of forest energy terminals. *Nauka i innovatsii* [Science and innovation], 2012, no. 7, pp. 69–72 (In Russian).

12. Fedorenchik A. S., Leonov E. A. Ensuring sustainable supply of energy facilities with wood fuel with the creation of the minimum required reserves. *Lesnoy vestnik* [Forestry bulletin], 2014, no. S2, pp. 146–150 (In Russian).

13. Leonov E. A., Ignatenko V. V., Klokov D. V. The mathematical model of chipper work given its technical failures. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 40–44 (In Russian).

14. Leonov E. A. Sustainable supply of wood fuel energy facilities with the establishment of minimum required reserves. *Trudy BGTU* [Proceedings BSTU], 2014, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 17–19 (In Russian).

Информация об авторах

Леонов Евгений Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: debager13@rambler.ru

Клоков Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная графика машиностроительного профиля». Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, ул. Я. Коласа, 12, Республика Беларусь). E-mail: klokoff_dm@belstu.by

Гарабажиу Александр Андреевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инженерной графики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: garazh@tut.by.

Духовник Алеся Александровна – студентка. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: alesya. duhovnik@mail.ru

Information about the authors

Leonov Evgeniy Anatol'yevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: debager13 @rambler.ru

Klokov Dmitriy Viktorovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Engineering Graphics for Machine-Building. Belarusian National Technical University (12, Y. Kolasa str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: klokoff_dm@mail.ru

Garabazhiu Aleksandr Andreyevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Engineering Drawing. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: garazh@tut.by

Dukhovnik Alesya Aleksandrovna – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alesya.duhovnik@mail.ru

Поступила 11.03.2020

УДК 519.87:630*332.3

Д. А. Кононович, С. Е. Арико, С. П. Мохов, М. К. Асмоловский
Белорусский государственный технологический университет

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ КОМПЛЕКСА МАШИН ДЛЯ СБОРА И ТРАНСПОРТИРОВКИ ЛЕСОСЕЧНЫХ ОТХОДОВ

В статье представлена разработанная математическая модель работы комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов, позволяющая осуществлять агрегатирование навесного и прицепного технологического оборудования. Математическая модель дает возможность в отдельности оценить динамическую нагруженность в узлах базового шасси и технологического оборудования, устойчивость при выполнении технологических операций, установить изменение опорных реакций в зависимости от места установки технологического оборудования для сбора лесосечных отходов, производить оценку тяговых и сцепных свойств и проходимости с целью оптимизации компоновки комплекса машин. Также математическая модель описывает процесс взаимодействия машины для транспортировки лесосечных отходов с предметом труда и позволяет производить оценку устойчивости лесной машины при выполнении погрузочно-разгрузочных операций. Для анализа перераспределения опорных реакций, возникающих усилий и нагрузок, действующих на базовое шасси и технологическое оборудование, задается микропрофиль опорной поверхности движения с представленными в нем различными длинами и высотами неровности. В статье приведены результаты моделирования и построены графики зависимостей угловых перемещений в продольной и поперечной плоскостях и вертикальное перемещение комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов, а также установлены зависимости изменения опорных реакций под колесами базового шасси и полуприцепа.

Ключевые слова: математическая модель, комплекс машин, лесосечные отходы, технологическое оборудование, микропрофиль, препятствие, воздействие.

D. A. Kononovich, S. Ye. Ariko, S. P. Mokhov, M. K. Asmolovskiy
Belarusian State Technological University

MATHEMATICAL MODEL OF WORK OF THE COMPLEX OF MACHINES FOR COLLECTION AND TRANSPORTATION OF FORESTRY WASTES

The article presents the developed mathematical model of the operation of a complex of machines for collecting and transporting logging waste, which allows for the aggregation of mounted and trailed technological equipment. The mathematical model makes it possible to individually assess the dynamic loading in the nodes of the base chassis and technological equipment, the stability during technological operations, establish the change in the support reactions depending on the installation site of the technological equipment for collecting logging waste, to evaluate the traction and coupling properties and throughput in order to optimize layout of a complex of machines. The mathematical model also describes the process of interaction of a machine for transporting logging waste with an object of labor and allows us to evaluate the stability of a forest machine during loading and unloading operations. For the analysis of the redistribution of support reactions, the arising forces and loads acting on the base chassis and technological equipment, a microprofile of the support surface of the movement with various lengths and heights of unevenness presented in it is set. The article presents the simulation results and graphs of the dependences of angular displacements in the longitudinal and transverse planes and the vertical movement of a set of machines for collecting and transporting logging waste, as well as the dependencies of changes in support reactions under the wheels of the base chassis and semitrailer are established.

Key words: mathematical model, complex of machines, forestry wastes, technological equipment, microprofile, let, impact.

Введение. Процесс машинизированного сбора лесосечных отходов в валы на лесосеке и их дальнейшая транспортировка сопровождается значительными динамическими нагрузками, связанными с технологическими особенностями заготовки такого вида древесного сырья. Осуществляя челночные движения по лесосеке, машина для сбора лесосечных отходов воспринимает различные динамические нагрузки от пней, корней, камней, ям и иных неровностей волока. При движении по волоку с открытыми бортами с выполнением погрузки лесосечных

отходов кроме рассмотренных нагрузок возникают и значительные инерционные нагрузки. Указанные нагрузки негативно влияют на прочность конструкции лесной машины и ее топливную экономичность, воздействуют на оператора. Для снижения их отрицательного влияния требуется проведения ряда теоретических и экспериментальных исследований. Их неотъемлемой частью является создание подробной математической модели комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов, которая позволяет производить оценку характера возмущающих воздействий на базовый трактор, а также разрабатывать рекомендации по выбору рациональной компоновки технологического оборудования с базовым трактором на основе снижения динамических нагрузок [1–3].

Основная часть. На рис. 1 приведена расчетная схема динамической системы комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов.

Данная схема имеет девять степеней свободы. Положение проектируемого комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов определяется следующими обобщенными координатами: вертикальным перемещением центра тяжести машины и полуприцепа соответственно Z_1, Z_2, угловыми перемещениями центра тяжести φ_1 и φ_2 и переднего моста машины φ_3, угловыми перемещениями центра тяжести полуприцепа φ_4 и φ_5 и балансиров колес полуприцепа φ_6 и φ_7.

Модель (рис. 1) комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов описывается восьмью сосредоточенными массами. Схема включает массу базового трактора, массу навесного устройства с технологическим оборудованием для сбора лесосечных отходов, массу полуприцепа, массу технологического оборудования полуприцепа, массу колонны, стрелы, рукояти, массу грейфера. К массе базового трактора приведена масса переднего моста. Особенностью данной модели является рассмотрение динамики комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов в зависимости от внешних воздействий на технологическое оборудование при выполнении технологических операций, оценки общей компоновки базового трактора с технологическим оборудованием на основании оценки распределения опорных реакций. Модель позволяет также рассматривать динамику базового шасси как без технологического оборудования, так и с установленным технологическим оборудованием на переднем брусе трактора или на задней гидравлической навеске, оценивать устойчивость машины при выполнении погрузочно-разгрузочных и транспортных операций.

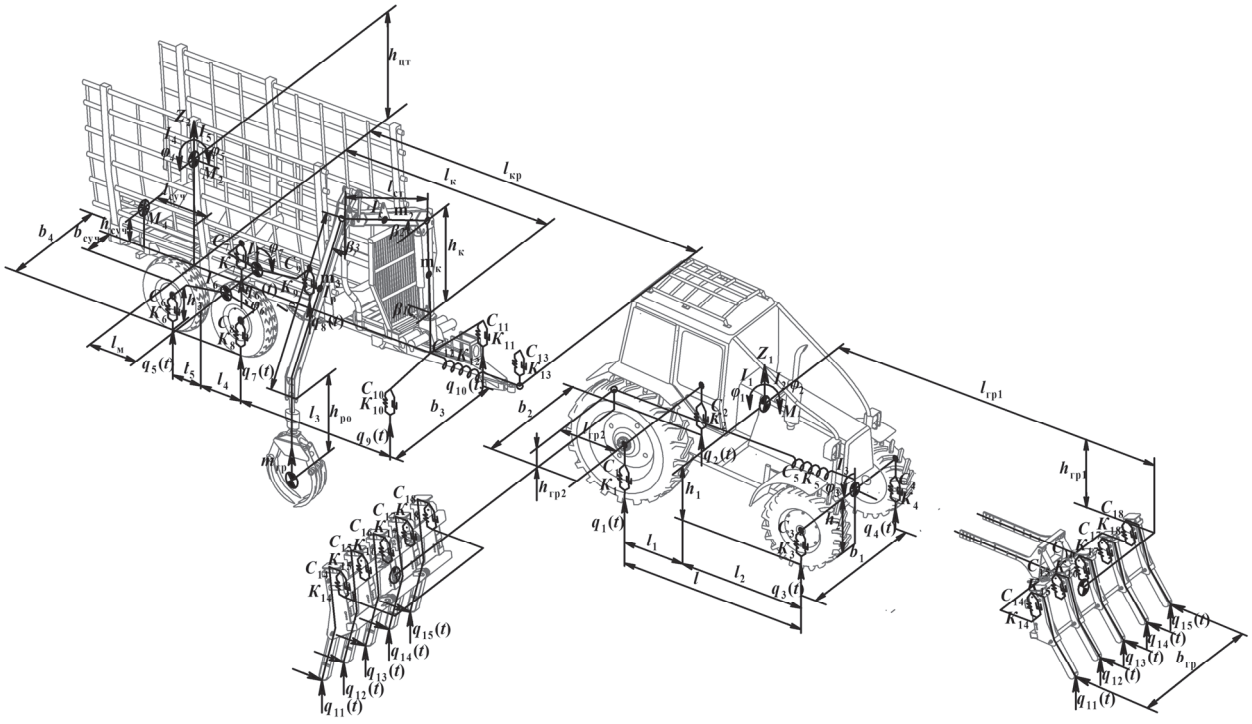


Рис. 1. Расчетная схема математической модели комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов

Для составления системы дифференциальных уравнений, описывающих колебательные процессы, которые происходят с комплексом машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов, использовали уравнение Лагранжа второго рода (формула (1)):

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial T}{\partial q_i}\right)-\frac{\partial T}{\partial q_i}+\frac{\partial \Pi}{\partial q_i}+\frac{\partial R}{\partial q_i}=Q_i, \qquad (1)$$

где T и П – кинетическая и потенциальная энергии системы соответственно; R – диссипативная функция Релея; q_i – обобщенная координата; Q_i – внешние обобщенные силы.

В расчетной динамической схеме работы комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов приняты следующие обозначения: c_1, c_2, c_3, c_4, c_6, c_7, c_8, c_9, k_1, k_2, k_3, k_4, $k_{ш6}$, $k_{ш7}$, $k_{ш8}$, $k_{ш9}$, – коэффициенты вертикальной жесткости (Н/м) и демпфирования (Н·с/м) шин; c_5, c_{12}, k_5, k_{12} – крутильная жесткость (Н/м) и коэффициенты демпфирования (Н·с/м) в месте соединения базового трактора с передним мостом и полуприцепом соответственно; c_{14}, c_{15}, c_{16}, c_{17}, c_{18}, k_{14}, k_{15}, k_{16}, k_{17}, k_{18} – коэффициенты вертикальной жесткости (Н/м) и демпфирования (Н·с/м) пружин технологического оборудования для сбора лесосечных отходов; c_{10}, c_{11}, k_{10}, k_{11} – коэффициенты вертикальной жесткости (Н/м) и демпфирования (Н·с/м) аутригеров; c_{13}, k_{13} – коэффициенты вертикальной жесткости (Н/м) и демпфирования (Н·с/м) в месте соединения полуприцепа с базовым трактором; b_1, b_2 – расстояния между передней и задней осью базового шасси, м; b_3, b_4 – расстояния между балансирами колес полуприцепа и аутригерами соответственно, м; h_1, h_2 – высоты от опорной поверхности до центра тяжести базового шасси и полуприцепа соответственно, м; $b_{суч}$, $h_{суч}$ – ширина и высота расположения центра тяжести пачки лесосечных отходов, м; l_1, l_2 – расстояния от задней и передней оси базового шасси до центра тяжести, м; l_3 – расстояние от аутригеров до балансира колес полуприцепа, м; l_4, l_5 – расстояния от оси балансира до центра колес, м; $l_м$ – расстояние от центра оси балансира до массы полуприцепа, м; $l_к$, $l_{ст}$, $l_р$ – длины колонны, стрелы и рукояти гидроманипулятора соответственно, м; $l_{суч}$ – расстояние от места соединения дышла полуприцепа до центра массы полуприцепа с технологическим оборудованием, м; $l_к$ – расстояние от колонны гидроманипулятора до массы полуприцепа, м; $l_{гр1}$, $l_{гр2}$ – расстояния от центра масс базового шасси до центра масс технологического оборудования для сбора лесосечных отходов, установленного спереди или сзади соответственно, м; $h_{ро}$ – расстояние от центра массы грейфера с лесосечными отходами до места соединения с рукоятью, м; M_1, M_2, M_3 – массы базового шасси, полуприцепа с технологическим оборудованием для транспортировки лесосечных отходов и технологического оборудования для сбора лесосечных отходов с навесной системой соответственно, Н; M_4 – масса лесосечных отходов на грузовой платформе, Н; $m_к$, $m_с$, $m_р$ – массы колонны, стрелы и рукояти гидроманипулятора соответственно, Н; $m_{гр}$ – масса грейфера гидроманипулятора, Н; I_1, I_3, I_4 – моменты инерции центра тяжести базового шасси, переднего моста базового шасси и полуприцепа с технологическим оборудованием для транспортировки лесосечных отходов в поперечной плоскости соответственно, кг·м^2; I_2, I_5, I_6, I_7 – моменты инерции центра тяжести базового шасси, полуприцепа с технологическим оборудованием для транспортировки лесосечных отходов и балансиров полуприцепа в продольной плоскости соответственно, кг·м^2; $q_1(t)$, $q_2(t)$, $q_3(t)$, $q_4(t)$, $q_5(t)$, $q_6(t)$, $q_7(t)$, $q_8(t)$, $q_9(t)$ – функция микропрофиля поверхности движения, м [4–7].

Выражения, по которым определяются кинетическая, потенциальная энергии и диссипативная функция Релея рассматриваемого комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов, имеют следующий вид:

$$K=\frac{1}{2}\Big(M_1Z_1^2+M_2Z_2^2+M_3Z_1^2+M_4Z_2^2+m_кZ_2^2+$$
$$+m_сZ_2^2+m_рZ_2^2+m_1Z_2^2+I_1\varphi_1^2+I_2\varphi_2^2+I_3\varphi_3^3+I_4\varphi_4^2+$$
$$+I_5\varphi_5^2+I_6\varphi_6^2+I_7\varphi_7^2+I_{1гр}\varphi_1^2+I_{1гр}\,\varphi_2^2\Big)$$

$$\Pi=\Big(M_1\cdot g\cdot Z_1+M_2\cdot g\cdot Z_2+m_к\cdot g\cdot\left[Z_2-\varphi_5\cdot l_к\right]+m_с\cdot g\times$$
$$\times\left[Z_2-\varphi_4\cdot\frac{l_{ст}}{2}\cdot\cos\beta_2\cdot\sin\beta_1-\varphi_5\cdot\left(l_к-\frac{l_{ст}}{2}\cdot\cos\beta_2\cdot\cos\beta_1\right)\right]+$$
$$+m_р\cdot g\cdot\left[\left[Z_2-\varphi_4\cdot\left(l_{ст}\cdot\cos\beta_1+\frac{l_р}{2}\cdot\sin\beta_3\right)\right]\cdot\sin\beta_1-\right.$$
$$\left.-\varphi_5\cdot\left[l_к-\left(l_{ст}\cdot\cos\beta_2+\frac{l_р}{2}\sin\beta_3\right]\cdot\cos\beta_1\right]+m_1\cdot g\cdot\left[Z_2-\varphi_4\times\right.\right.$$
$$\times\left(l_{ст}\cdot\cos\beta_1+l_р\cdot\sin\beta_3\right)\cdot\sin\beta_1-\varphi_5\cdot\left(l_к-\left(l_{ст}\cdot\cos\beta_2+l_р\cdot\sin\beta_3\right)\times\right.$$
$$\left.\left.\times\cos\beta_1\right)\right)\Big]+M_4\cdot g\cdot\left(Z_2-\varphi_4\cdot b_{суч}+\varphi_5\cdot l_{суч}\right)+M_3\cdot g\cdot Z_1-M_3\cdot g\times$$
$$\times l_{гр1}\cdot\varphi_2+\frac{c_1\cdot\lambda_1^2}{2}+\frac{c_2\cdot\lambda_2^2}{2}+\frac{c_3\cdot\lambda_3^2}{2}+\frac{c_4\cdot\lambda_4^2}{2}+\frac{c_5\cdot\lambda_5^2}{2}+\frac{c_6\cdot\lambda_6^2}{2}+$$
$$+\frac{c_7\cdot\lambda_7^2}{2}+\frac{c_8\cdot\lambda_8^2}{2}+\frac{c_9\cdot\lambda_9^2}{2}+\frac{c_{10}\cdot\lambda_{10}^2}{2}+\frac{c_{11}\cdot\lambda_{11}^2}{2}+\frac{c_{12}\cdot\lambda_{12}^2}{2}+\frac{c_{13}\cdot\lambda_{13}^2}{2}+$$
$$+\frac{c_{14}\cdot\lambda_{14}^2}{2}+\frac{c_{15}\cdot\lambda_{15}^2}{2}+\frac{c_{16}\cdot\lambda_{16}^2}{2}+\frac{c_{17}\cdot\lambda_{17}^2}{2}+\frac{c_{18}\cdot\lambda_{18}^2}{2}\Big);$$

$$R=\frac{1}{2}\cdot\Big(k_1\cdot\lambda_1^2+k_2\cdot\lambda_2^2+k_3\cdot\lambda_3^2+k_4\cdot\lambda_4^2+k_5\cdot\lambda_5^2+k_6\cdot\lambda_6^2+k_7\cdot\lambda_7^2+$$
$$+k_8\cdot\lambda_8^2+k_9\cdot\lambda_9^2+k_{10}\cdot\lambda_{10}^2+k_{11}\cdot\lambda_{11}^2+k_{12}\cdot\lambda_{12}^2+k_{13}\cdot\lambda_{13}^2+k_{14}\cdot\lambda_{14}^2+$$
$$+k_{15}\cdot\lambda_{15}^2+k_{16}\cdot\lambda_{16}^2+k_{17}\cdot\lambda_{17}^2+k_{18}\cdot\lambda_{18}^2\Big).$$

Величины деформаций соответствующих элементов в вертикальной плоскости определялись так:

$$\lambda_1 = Z_1 - \frac{b_2}{2}\cdot\varphi_1 + l_1\cdot\varphi_2 - q_1(t);$$

$$\lambda_2 = Z_1 + \frac{b_2}{2}\cdot\varphi_1 + l_1\cdot\varphi_2 - q_2(t);$$

$$\lambda_3 = Z_1 - \frac{b_1}{2}\cdot\varphi_3 - l_2\cdot\varphi_2 - q_3(t);$$

$$\lambda_4 = Z_1 + \frac{b_1}{2}\cdot\varphi_3 - l_2\cdot\varphi_2 - q_4(t);$$

$$\lambda_5 = \varphi_3 - \varphi_1;$$

$$\lambda_6 = Z_2 - \frac{b_4}{2}\cdot\varphi_4 - l_м\cdot\varphi_5 + l_5\cdot\varphi_6 - q_5(t);$$

$$\lambda_7 = Z_2 + \frac{b_4}{2}\cdot\varphi_4 - l_м\cdot\varphi_5 + l_5\cdot\varphi_7 - q_6(t);$$

$$\lambda_8 = Z_2 - \frac{b_4}{2}\cdot\varphi_4 - l_м\cdot\varphi_5 + l_4\cdot\varphi_6 - q_7(t);$$

$$\lambda_9 = Z_2 + \frac{b_4}{2}\cdot\varphi_4 - l_м\cdot\varphi_5 - l_4\cdot\varphi_7 - q_8(t);$$

$$\lambda_{10} = Z_2 - \frac{b_3}{2}\cdot\varphi_4 - l_к\cdot\varphi_5 - q_9(t);$$

$$\lambda_{11} = Z_2 + \frac{b_3}{2}\cdot\varphi_4 - l_к\cdot\varphi_5 - q_{10}(t);$$

$$\lambda_{12} = \varphi_4 - \varphi_1;$$

$$\lambda_{13} = -Z_2 + l_{кр}\cdot\varphi_5 + Z_1 + \varphi_2\cdot(l_{гр} + l_1);$$

$$\lambda_{14} = -Z_1 + l_{гр1}\cdot\varphi_2 + \varphi_1\cdot\frac{b_{гр}}{2} + q_{11}(t);$$

$$\lambda_{15} = -Z_1 + l_{гр1}\cdot\varphi_2 + \varphi_1\cdot\frac{b_{гр}}{4} + q_{12}(t);$$

$$\lambda_{16} = -Z_1 + l_{гр1}\cdot\varphi_2 + q_{13}(t);$$

$$\lambda_{17} = -Z_1 + l_{гр1}\cdot\varphi_2 - \varphi_1\cdot\frac{b_{гр}}{4} + q_{14}(t);$$

$$\lambda_{18} = -Z_1 + l_{гр1}\cdot\varphi_2 - \varphi_1\cdot\frac{b_{гр}}{2} + q_{15}(t).$$

Далее подставляя выражения деформаций в уравнение Лагранжа второго рода, осуществлялось дифференцирование по переменным, имеющимся в расчетной схеме. Решение системы дифференциальных уравнений производилось с помощью математического программного обеспечения MathCad 15 [8].

Микропрофиль поверхности движения задавался с помощью аппроксимации значений высот, снятых с реальной поверхности волока. Учитывая то, что на лесосеке во время движения комплекс машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов переезжает различные препятствия (пни, корни, камни, ямы, поваленные деревья и т. д.), моделирование процесса движения формировалось с различными высотами этих неровностей.

Решение математической модели производилось с помощью метода Рунге – Кутта 4-го порядка. Результатом решения математической модели являются матрицы отклонений каждой степени свободы и их первых производных [9–12].

Вертикальные перемещения корпуса базового шасси и полуприцепа при движении по установленному микропрофилю с переездом единичной неровности представлены на рис. 2.

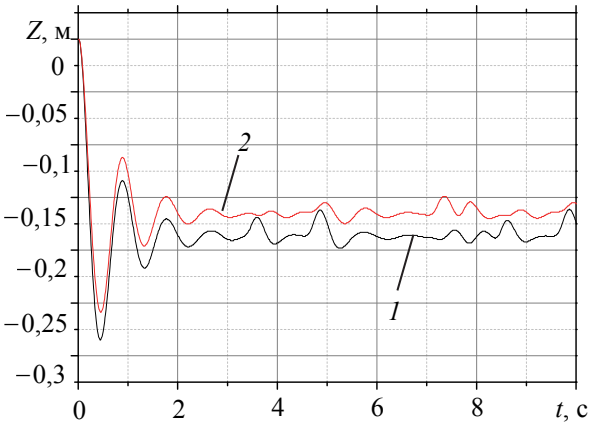


Рис. 2. Вертикальные перемещения базового шасси (*1*) и полуприцепа (*2*)

Процесс движения комплекса машин начинался с 3-й секунды. Переезд единичных неровностей левым колесом базового шасси осуществляется на 3,3-й секунде, а на 4,4-й секунде задним левым колесом. Колеса балансирной тележки осуществляют переезд единичной неровности на участке в диапазоне 7,0–8,3 с.

Угловые перемещения корпуса базового шасси и полуприцепа в поперечной плоскости представлены на рис. 3.

При переезде единичной неровности корпус базового шасси в поперечной плоскости отклоняется на 1,94°, а корпус полуприцепа – на 1,3°.

Угловые перемещения корпуса базового шасси и полуприцепа в продольной плоскости представлены на рис. 4.

При переезде единичной неровности базовым шасси его корпус отклоняется в продольной плоскости на 1,14°, а корпус полуприцепа – на 0,4°, это связано с тем, что балансирная тележка имеет возможность качания в продольной плоскости, что обеспечивает сглаживание неровности.

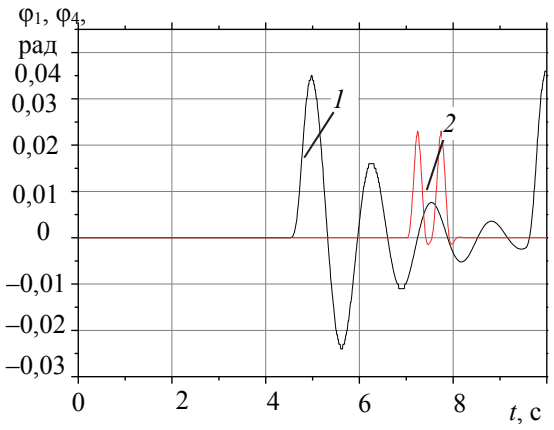


Рис. 3. Угловые перемещения базового шасси (1) и полуприцепа (*2*) в поперечной плоскости

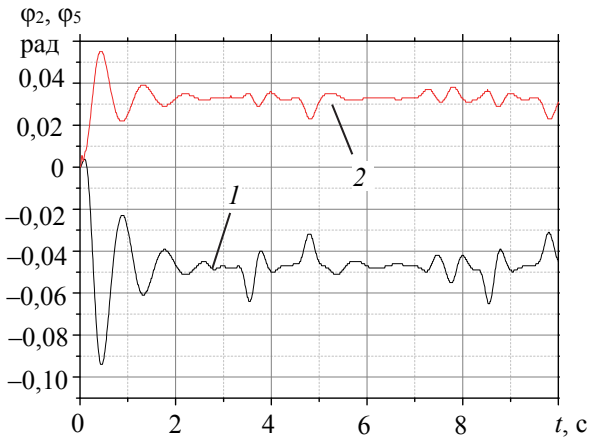


Рис. 4. Угловые перемещения базового шасси (*1*) и полуприцепа (*2*) в продольной плоскости

Перераспределение опорных реакций под колесами комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов при движении по микропрофилю с неровностями высотой 0,1 м представлены на рис. 5.

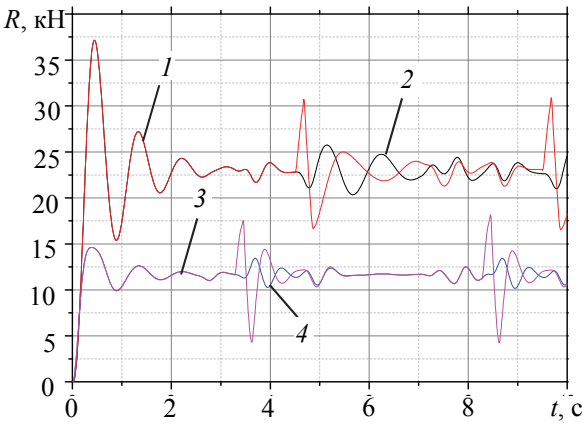


Рис. 5. Изменение опорных реакций под колесами базового шасси:
1, *2* – изменение опорных реакций под задними правым и левым колесами соответственно;
3, *4* – изменение опорных реакций под передними правым и левым колесами соответственно

В соответствии с приведенной зависимостью при переезде единичной неровности передним левым и задним левым колесами динамическая реакция достигает 17,5 и 30,7 кН соответственно (рис. 5). При преодолении этого же препятствия колесами балансирной тележки динамическая реакция достигает 21 кН (рис. 6).

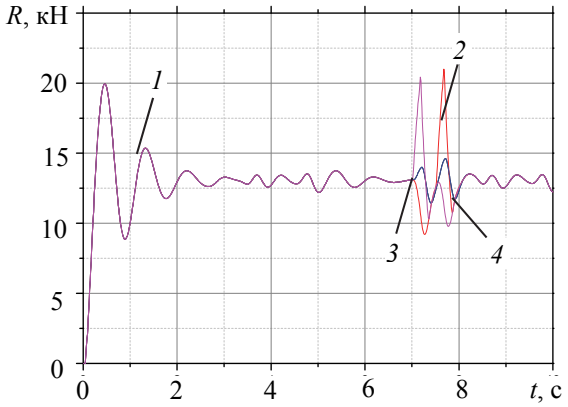


Рис. 6. Изменение опорных реакций под колесами балансирной тележки полуприцепа:
1, *2* – изменение опорных реакций под задним и передним правыми колесами балансира соответственно; *3*, *4* – изменение опорных реакций под задним и передним правым и левым колесами соответственно

Для определения динамической нагруженности рам и отдельных элементов базового шасси и полуприцепа при преодолении порогового препятствия целесообразным является применение коэффициентов динамичности, которые определялись отношением максимальной динамической реакции при преодолении препятствия к статической реакции [13–15].

В результате моделирования установлено, что при переезде препятствия высотой 0,1 м левым бортом коэффициенты динамичности составили под передним левым колесом базового шасси – 1,48; задним левым колесом базового шасси – 1,34; под левыми колесами балансира – 1,59. Под колесами правого борта без преодоления препятствия коэффициенты динамичности составили под передним колесом базового шасси – 1,1; задним колесом базового шасси – 1,15; под колесами балансира – 1,1.

Заключение. Разработана математическая модель комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов для оценки динамической нагруженности в продольной и поперечной плоскостях. Она позволяет производить выбор базового шасси машины для сбора лесосечных отходов и оценивать компоновочные решения по установке технологического оборудования, а также получить данные по распределению величин опорных реакций при выполнении технологических операций.

Список литературы

1. Жуков А. В. Теория лесных машин. Минск: БГТУ, 2001. 640 с.
2. Леонов Е. А., Игнатенко В. В., Клоков Д. В. Математическая модель работы рубильной машины с учетом ее технических отказов // Труды БГТУ. 2016. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 40–44.
3. Симанович В. А., Кононович Д. А., Исаченков В. С. Влияние динамической нагруженности на эксплуатационные показатели колесных лесных машин // Труды БГТУ. 2016. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 54–57.
4. Клоков Д. В., Турлай И. В. Модели работы лесных машин с учетом надежности // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 66–67.
5. Мохов С. П., Симанович В. А., Арико С. Е. Оценка влияния внешних силовых факторов на процесс падения дерева // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 28–31.
6. Лой В. Н., Германович А. О. Моделирование работы самоходной рубильной машины с автономным двигателем // Труды БГТУ. 2013. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 18–21.
7. Голякевич С. А. Анализ эксплуатационных режимов работы многооперационных лесозаготовительных машин // Труды БГТУ. 2013. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 72–78.
8. Арико С. Е. Математическая модель работы харвестерной машины 4К4 // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2010. Вып. XVIII. С. 113–117.
9. Симанович В. А. Оценка динамического нагружения колесных лесных машин на эксплуатационных режимах работы // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2010. Вып. XVIII. С. 122–125.
10. Голякевич С. А. Математическая модель для оценки нагруженности несущих конструкций многооперационных лесозаготовительных машин // Труды БГТУ. 2013. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 65–71.
11. Голякевич С. А., Гороновский А. Р. Нагруженность несущей конструкции харвестера при выполнении технологических операций // Труды БГТУ. 2011. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 27–30.
12. Симанович В. А., Пищов М. Н., Смеян А. И. Особенности эксплуатационных режимов нагружения лесных агрегатных машин // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2007. Вып. XV. С. 77–78.
13. Симанович В. А., Исаченков В. С., Бобрович В. А. Оценка динамической нагруженности трелевочной системы «колесный трактор – пачка деревьев» // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2007. Вып. XV. С. 74–76.
14. Пищов С. Н. Математическая модель колебаний форвардера 6К6 повышенной грузоподъемности // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2007. Вып. XV. С. 52–55.
15. Исаченков В. С., Симанович В. А. Математическая модель колесной трелевочной машины // Труды БГТУ. 2011. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 75–81.

References

1. Zhukov A. V. *Teoriya lesnykh mashin* [The theory of forest machines]. Minsk, BGTU Publ., 2001. 640 p.
2. Leonov E. A., Ignatenko V. V., Klokov D. V. Mathematical model of the chipper machine taking into account its technical failures. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 31–35 (In Russian).
3. Simanovich V. A., Kononovich D. A., Isachenkov V. S. The impact of dynamic loading on the performance of wheeled forest machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 54–57 (In Russian).
4. Klokov D. V., Turlay I. V. Reliability models of forest machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 66–67 (In Russian).
5. Mokhov S. P., Simanovich V. A., Ariko S. Ye. Assessment of the influence of external force factors on the process of tree fall. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 28–31 (In Russian).
6. Loy V. N., Germanovich A. O. Modeling the work of a self-propelled chipper with an autonomous engine. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 18–21 (In Russian).
7. Golyakevich S. A. Modeling the work of a self-propelled chipper with an autonomous engine. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 72–78 (In Russian).

8. Ariko S. Ye. The mathematical model of the harvester 4W4. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 2, Forest and Woodworking Industry, 2010, issue 18, pp. 113–117 (In Russian).

9. Simanovich V. A. Evaluation of the dynamic loading of wheeled forest machines at operational operating modes. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 2, Forest and Woodworking Industry, 2010, issue 18, pp. 122–125 (In Russian).

10. Golyakevich S. A. A mathematical model for assessing the load bearing structures of multi-operational forestry machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 65–71 (In Russian).

11. Golyakevich S. A., Goronovskiy A. R. The load bearing structure of the harvester during technological operations. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2011, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 27–30 (In Russian).

12. Simanovich V. A., Pishchov M. N., Smeyan A. I. Features of operational modes of loading of forest modular machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 2, Forest and Woodworking Industry, 2007, issue 15, pp. 77–78 (In Russian).

13. Simanovich V. A., Isachenkov V. S., Bobrovich V. A. Evaluation of the dynamic loading of the skidding system "wheeled tractor – a pack of trees". *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 2, Forest and Woodworking Industry, 2007, issue 15, pp. 74–76 (In Russian).

14. Pishchov S. N. Mathematical model of oscillations of a forwarder 6W6 of increased carrying capacity. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 2, Forest and Woodworking Industry, 2007, issue 15, pp. 52–55 (In Russian).

15. Isachenkov V. S., Simanovich V. A. Mathematical model of a skidder. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2011, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 75–81 (In Russian).

Информация об авторах

Кононович Денис Александрович – ассистент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: denkon_92@mail.ru

Арико Сергей Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: sergeyariko@mail.ru

Мохов Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lmitlz@belstu.by

Асмоловский Михаил Корнеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: asmika59@mail.ru

Information about the authors

Kononovich Denis Aleksandrovich – Assistant Lecturer, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: denkon_92@mail.ru

Ariko Sergey Yevgen'evich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sergeyariko@mail.ru

Mokhov Sergey Petrovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lmitlz@belstu.by

Asmolovskiy Mikhail Korneevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: asmika59@mail.ru

Поступила 25.03.2020

УДК 630*377.4

В. С. Исаченков, В. А. Симанович
Белорусский государственный технологический университет

К ВОПРОСУ ВЫБОРА ТИПА ПРИЦЕПНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ КОЛЕСНЫХ ТРЕЛЕВОЧНЫХ МАШИН

При лесосечных работах на участках со слабой несущей способностью почвогрунтов повышение тягово-динамических качеств колесных трелевочных машин может быть достигнуто совершенствованием конструкции двигателя, трансмиссии, ходовой части или технологического оборудования. Такими изменениями можно добиться перераспределения нагрузок на несущие системы в процессе движения и снизить динамическую нагруженность машин, увеличив их производительность и долговечность.

Основным путем дальнейшего развития конструкции колесных трелевочных машин, на наш взгляд, является совершенствование технологического оборудования, правильный выбор которого обусловлен природно-климатическими условиями лесозаготовок.

В статье представлены математические модели движения колесной трелевочной машины с различными по конструктивным особенностям типами прицепного технологического оборудования, где в качестве опорной системы принималась двухосная тележка. Проведена оценка динамической нагруженности основных элементов конструкции колесной трелевочной машины и технологического оборудования.

На основе анализа полученных результатов обоснован наиболее рациональный вариант усовершенствования конструкции технологического оборудования. Выбор канатно-чокерного технологического оборудования для колесной трелевочной машины при работе на грунтах со слабой несущей способностью позволяет, в сравнении с другими типами технологического оборудования, минимизировать динамическую нагруженность и энергетические затраты в процессе трелевки.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и изготовлении колесных трелевочных машин для лесозаготовок на предприятиях Республики Беларусь.

Ключевые слова: математическая модель, движение, колесная трелевочная машина, технологическое оборудование, динамическая нагруженность.

V. S. Isachenkov, V. A. Simanovich
Belarusian State Technological University

TO THE QUESTION OF CHOOSING THE TYPE OF TRAILED TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF SKIDDERS

During logging operations in areas with weak bearing capacity of soil, an increase in the traction and dynamic qualities of wheel skidders can be achieved by improving the design of the engine, transmission, chassis or technological equipment. Such changes can achieve a redistribution of loads on the load-bearing systems during movement and reduce the dynamic loading of machines, increasing their productivity and durability.

The main way of further development of the design of wheeled skidders, in our opinion, is the improvement of technological equipment, the correct choice of which is due to the natural and climatic conditions of logging.

The article presents mathematical models of the movement of a skidder with different design features of the types of trailed technological equipment, where a biaxial trailer was adopted as a support system. The dynamic loading of the basic structural elements of the wheel skidder and technological equipment was evaluated.

Based on the analysis of the results obtained, the most rational option for improving the design of technological equipment is substantiated. The choice of cable-chock technological equipment for a skidder when working on soils with low bearing capacity allows, in comparison with other types of technological equipment, to minimize dynamic loading and energy costs in the process of skidding.

The results can be used in the design and manufacture of forest logging machines for logging at enterprises of the Republic of Belarus.

Key words: mathematical model, movement, skidder, technological equipment, dynamic loading.

Введение. Процесс лесозаготовки включает в себя взаимосвязанные последовательные операции, такие как валка деревьев, обрезка сучьев, при необходимости раскряжевка на том или ином этапе, трелевка и последующая вывозка древесного сырья потребителям. Большинство операций на сегодняшний момент выполняются комплексами машин и механизмов, однако для значительной части лесосечного фонда, расположенного на почвогрунтах со слабой несущей способностью, остается открытым вопрос целесообразного способа трелевки. Процесс трелевки включает в себя холостой ход трелевочной машины, формирование пачки хлыстов или сортиментов, рабочий ход и разгрузку пачки на погрузочном пункте [1, 2].

В Республике Беларусь на заготовке древесного сырья в указанных условиях работы в настоящее время используются колесные трелевочные машины (КТМ) с канатно-чокерным технологическим оборудованием, в частности ТТР-401. Для преодоления участка трелевочных или магистральных волоков со слабой несущей способностью почвогрунта при буксовании для этих машин во время рабочего хода используется прием сброса пачки с последующим ее подтаскиванием [3].

Повышение тягово-динамических качеств КТМ может быть достигнуто совершенствованием двигателя, ходовой части и правильным выбором типа технологического оборудования, за счет чего можно добиться перераспределения нагрузок на несущую систему в процессе движения и тем самым снизить динамическую нагруженность [3–8].

В качестве решения данной задачи предлагается изменить конструкцию технологического оборудования установкой дополнительной опорной системы с возможностью использования в качестве как навесного, так и прицепного варианта. В начальный момент буксования технологическое оборудование переводится из навесного положения в прицепное, и КТМ, не теряя темпа работы, преодолевает проблемный участок. После преодоления указанного участка технологическое оборудование переводится в навесное положение, что значительно снижает энергетические потери во время преодоления участков с удовлетворительной несущей способностью почвогрунта.

В ранее выполненных работах были теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены основные параметры прицепного технологического оборудования (ПТО) [9–11]. Однако дальнейшие исследования поставили вопрос о необходимости сравнительного анализа различных по конструктивным особенностям типов применяемого технологического оборудования, а также конструкций опорных системы ПТО.

Основным методом теоретических исследований в настоящее время является разработка математических моделей движения специальных транспортных средств на основе методов системного подхода и синтеза, которое широко применяется для лесозаготовительной техники различного назначения.

В представленной работе рассматриваются динамические системы, в которых технологическое оборудование КТМ размещено в прицепном варианте, а в качестве опорной системы выбрана двухосная тележка. В первом варианте выбран пачковый челюстной захват с гидроприводом (КЗ), размещенный на специальной арке (ПА) и обозначенный как 2ПКЗ; во втором варианте – гидрозажимной коник (ПК), обозначенный в дальнейшем как 2ПКН.

Основная часть. Основные принципы построения расчетных схем и составления математических моделей движения КТМ, оснащенной различными по компоновочному решению типами ПТО, имеют допущения, аналогичные математическому аппарату, представленному в работе [11]. Они предполагают нахождение независимых, изменяющихся во времени координат (степеней свободы), определяющих положение всех масс, входящих в системы, при рассмотрении переходных и установившихся режимов движения.

Расчетные динамические схемы определяются следующими обобщенными координатами: вертикальным, угловым и продольным перемещением центра тяжести КТМ – y_1, y_2, y_3; вертикальным перемещением центра тяжести переднего моста КТМ – y_4; вертикальным, угловым и продольным перемещением центра тяжести ПТО (ПК и ПА) – y_5, y_6, y_7; углом поворота коленчатого вала двигателя – y_8; углами поворота колес КТМ – y_9 и y_{10}; вертикальными и продольными перемещениями центра тяжести КЗ и дискретных масс пачки деревьев – y_{11}, y_{12}, y_{13}; вертикальным перемещением центра тяжести водителя и сидения – y_{14}.

Для расчетных схем и описывающих их уравнений приняты следующие параметры: $M_Д$ – момент двигателя; $I_Д$ – момент инерции вращающихся масс двигателя и ведущих частей сцепления; $I_{К1}$, $I_{К2}$ – моменты инерции элементов трансмиссии и колес КТМ, приведенные к их осям; $I_Т$, $I_{ПА}$, $I_{ПК}$ – моменты инерции КТМ, ПА и ПК соответственно; $M_Т$, $m_М$, $m_{ПА}$, $m_{ПК}$ – масса КТМ, подрессоренная масса переднего моста КТМ, масса ПА и ПК соответственно; $m_{КЗ}$, m_2 и m_3 – дискретные массы клещевого захвата и пачки хлыстов; $m_В$ – подрессоренная масса водителя и сиденья;

c_1, k_1 – коэффициенты вертикальной жесткости и сопротивления переднего моста КТМ; c_2, c_3, k_2, k_3 – коэффициенты вертикальной жесткости и сопротивления шин, установленных на колеса КТМ; c_{41}, c_{42}, k_{41}, k_{42} – коэффициенты вертикальной и горизонтальной жесткости и сопротивление сцепки КТМ с ПТО; c_{51}, c_{52}, k_{51}, k_{52} – коэффициенты вертикальной жесткости и сопротивления шин, установленных на колесах балансирной тележки ПТО; c_{61}, c_{62}, k_{61}, k_{62} – коэффициенты горизонтальной жесткости и сопротивления шин и почвогрунта, приведенные к точкам контакта колес КТМ с трелевочным волоком; c_7, c_8, k_7, k_8 – коэффициенты угловой жесткости и сопротивление валов привода переднего и заднего мостов КТМ; c_{11}, k_{11} – коэффициенты вертикальной жесткости и сопротивления пачки хлыстов; c_{12}, k_{12} – коэффициенты вертикальной жесткости и сопротивления сидения водителя; c_{13}, c_{14}, k_{13}, k_{14} – коэффициенты горизонтальной и вертикальной жесткости и сопротивления в КЗ; i_1, i_2 – передаточные числа приводов переднего и заднего мостов КТМ; a, b, $h_\text{Т}$ – координаты центра тяжести КТМ; $l_\text{В}$ – координата центра тяжести водителя и сидения; $l_\text{ПА}$, $h_\text{ПА}$ – координаты центра тяжести ПА; $l_\text{ПК}$, $h_\text{ПК}$ – координаты центра тяжести ПК; $l_\text{СЦ}$, $h_\text{СЦ}$, h_2 – координаты точек сцепки КТМ и ПТО; $L_\text{Х}$ – длина пачки хлыстов; l_1, l_2, – координаты центра тяжести пачки хлыстов; $h_\text{КЗ}$ – координата КЗ относительно трелевочного волока; $l_\text{КЗ}$ – координата центра тяжести КЗ относительно центра тяжести ПА; l_6, l_7 – расстояния от горизонтальных координат осей до центра тяжести ПТО; r_1, r_2, r_3, r_4 – радиусы качения шин колес КТМ и ПТО; q_1, q_2, q_3, q_4 – текущие значения ординат микропрофиля неровностей трелевочного волока под шинами колес КТМ и ПТО; $P_\text{К1}$, $P_\text{К2}$ – касательные силы тяги, развиваемые на колесах КТМ; P_{F1}, P_{F2}, P_{F3}, P_{F4} – силы сопротивления шин колес КТМ и ПТО; P_V – сила сопротивления волочению пачки хлыстов.

Массово-геометрические параметры, моменты инерции, силы сопротивления и касательные силы тяги для описания исследуемых динамических систем аналогичны данным в работе [11].

На рис. 1 представлены расчетные схемы динамической системы КТМ с ПТО различных компоновочных решений, разработанные с учетом ряда принятых допущений, на основе анализа ее конструкции и кинематики движения звеньев: *а* – 2ПКЗ (схема имеет четырнадцать степеней свободы); *б* – 2ПКН (схема имеет двенадцать степеней свободы).

Посредством математического аппарата, на основе системы высокоуровневого программирования MATLAB 7.11.0 (*R*2010*b*), получены матрицы численных значений отклонений степеней свободы моделей, первые производные этих отклонений и соответствующие им моменты времени протекания процесса, что позволило определить все необходимые параметры оценки динамической нагруженности КТМ, оснащенной различным по типу решения ПТО.

Так, изменения вертикальных ускорений по времени в центре тяжести ПТО определялись по следующим зависимостям:

а) для 2ПКЗ:

$$\begin{aligned}\ddot{Y}_5 = \Big[& c_{41}\left(Y_1 - \left(b + l_\text{СЦ}\right)Y_2 - Y_5 - \left(l_\text{ПА} - l_\text{СЦ}\right)Y_6\right) + \\ & + k_{41}\left(\dot{Y}_1 - \left(b + l_\text{СЦ}\right)\dot{Y}_2 - \dot{Y}_5 - \left(l_\text{ПА} - l_\text{СЦ}\right)\dot{Y}_6\right) - \\ & - c_{51}(Y_5 + l_6 Y_6 - Q_3) - k_{51}(\dot{Y}_5 + l_6\dot{Y}_6 - \dot{Q}_3) - \\ & - c_{52}(Y_5 - l_7 Y_6 - Q_4) - k_{52}(\dot{Y}_5 - l_7\dot{Y}_6 - \dot{Q}_4) - \\ & - c_{14}(Y_5 - l_\text{КЗ}Y_6 - Y_{11}) - k_{14}\left(\dot{Y}_5 - l_\text{КЗ}\dot{Y}_6 - \dot{Y}_{11}\right)\Big] / m_\text{ПА};\end{aligned}$$

б) для 2ПКН:

$$\begin{aligned}\ddot{Y}_5 = \Big[& c_{41}\left(Y_1 - \left(b + l_\text{СЦ}\right)Y_2 - Y_5 - \left(l_\text{ПК} - l_\text{СЦ}\right)Y_6\right) + \\ & + k_{41}\left(\dot{Y}_1 - \left(b + l_\text{СЦ}\right)\dot{Y}_2 - \dot{Y}_5 - \left(l_\text{ПК} - l_\text{СЦ}\right)\dot{Y}_6\right) - \\ & - c_{51}(Y_5 + l_6 Y_6 - Q_3) - k_{51}(\dot{Y}_5 + l_6\dot{Y}_6 - \dot{Q}_3) - \\ & - c_{52}(Y_5 - l_7 Y_6 - Q_4) - k_{52}(\dot{Y}_5 - l_7\dot{Y}_6 - \dot{Q}_4) - \\ & - l_2 c_{11}(l_2 Y_5 / L_\text{Х} - Y_{13}) / L_\text{Х} - \\ & - l_2 k_{11}(l_2\dot{Y}_5 / L_\text{Х} - \dot{Y}_{13}) / L_\text{Х}\Big] / m_\text{ПК}.\end{aligned}$$

Изменение вертикальных ускорений центра тяжести водителя и сидения по времени определялось по формуле

$$\ddot{Y}_{14} = [- c_{12}\left(Y_{14} - Y_1 + l_\text{В}Y_2\right) - k_{12}\left(\dot{Y}_{14} - \dot{Y}_1 + l_\text{В}\dot{Y}_2\right)] / m_\text{В}.$$

В данных уравнениях заглавные буквы степеней свободы означают полученные при моделировании матрицы результатов, обработка которых позволила построить графики нормированных спектральных плотностей ускорений центра тяжести ПТО, центра тяжести водителя и сидения и их изменения в зависимости от применяемого технологического оборудования.

Моделирование динамических процессов для различных типов ПТО проводилось при равных весовых, жесткостных и других параметрах систем. В частности, рассматривался процесса трелевки КТМ пачки деревьев объемом $V_\text{ХЛ}$ = 1,2 м^3 при скорости перемещения КТМ V = 4,57 км/ч при одинаковых характеристиках микропрофиля волока. Результаты обрабатывались методами математической статистики.

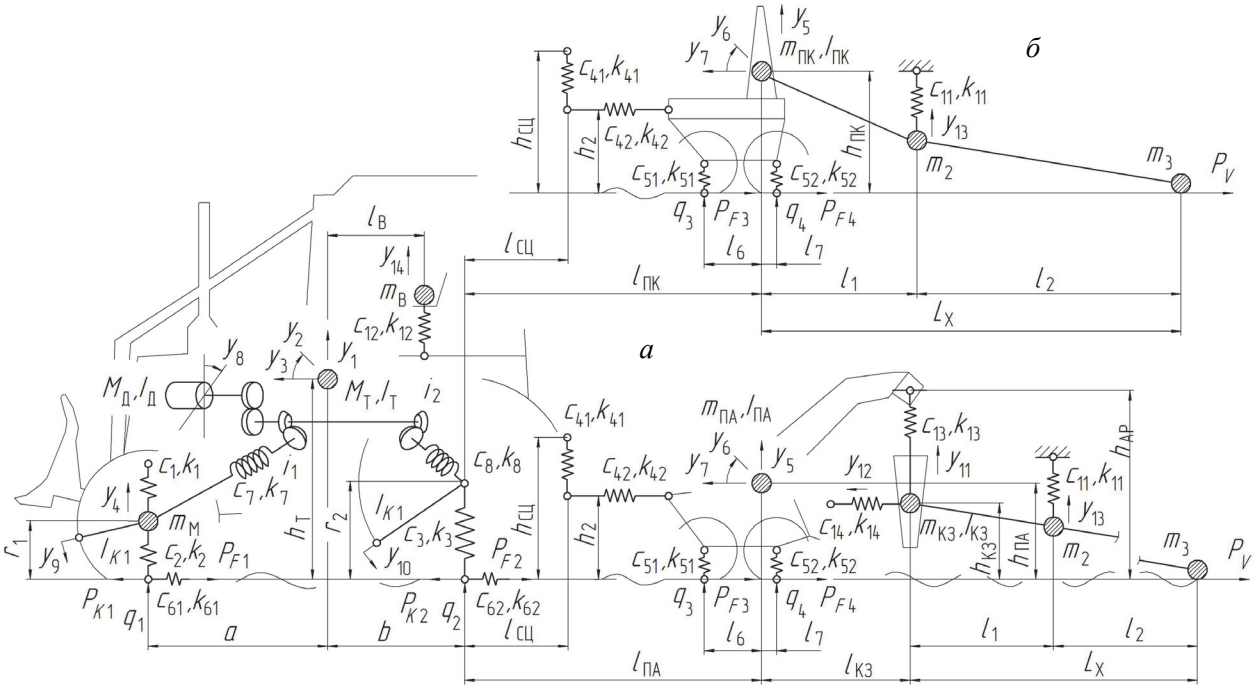


Рис. 1. Расчетные схемы динамической системы КТМ, оснащенной:
а – 2ПКЗ; *б* – 2ПКН

На рис. 2 представлены нормированные спектральные плотности ускорения центра тяжести различных типов ПТО при движении КТМ по магистральному волоку.

Для всех типов технологического оборудования максимум нормированной спектральной плотности ускорения центра тяжести ПТО проявляется дважды.

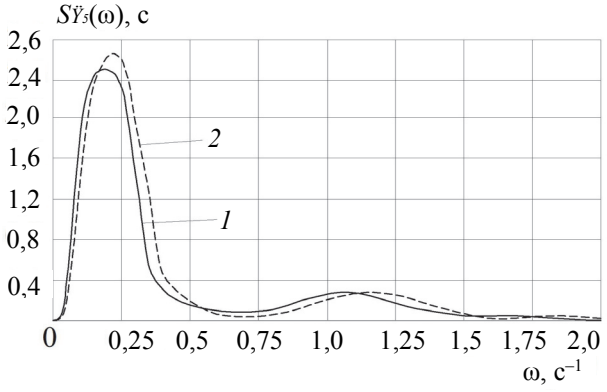


Рис. 2. Нормированные спектральные плотности вертикальных ускорений центра тяжести ПТО при движении по магистральному волоку:
1 – 2ПКЗ; *2* – 2ПКН

Первый раз для 2ПКЗ он проявляется при частоте 0,18 с$^{-1}$ и достигает значения 2,45 с, а для 2ПКН при частоте 0,21 с$^{-1}$ имеет значение 2,53 с. Во второй раз для 2ПКЗ при частоте 1,12 с$^{-1}$ он достигает 0,32 с, для 2ПКН при частоте 1,18 с$^{-1}$ – 0,36 с. Процесс снижения статистических величин ускорений затухает более интенсивно для 2ПКЗ.

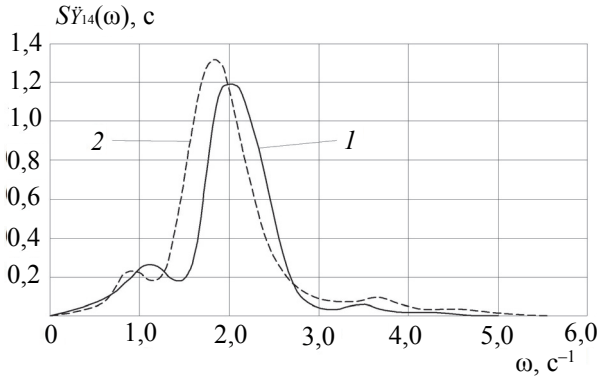


Рис. 3. Нормированные спектральные плотности вертикальных ускорений центра тяжести водителя и сидения при движении по магистральному волоку:
1 – 2ПКЗ; *2* – 2ПКН

Из графиков нормированных спектральных плотностей ускорения центра тяжести водителя и сидения (рис. 3) видно, что основные максимальные значения встречаются один раз и лежат в диапазоне частот от 1,8 до 2,1 с$^{-1}$, при этом абсолютные величины максимумов зависят от применяемого типа технологического оборудования. Абсолютный максимум при этом уменьшается для 2ПКЗ в 1,08 раза по сравнению с 2ПКН.

В результате теоретических исследований были определены основные весовые и геометрические размеры ПТО путем изменения

входящих в динамическую систему параметров, которые влияют на процессы движения КТМ.

Сравнение полученных результатов с выполненными ранее исследованиями КТМ позволяет сделать вывод о целесообразности применения прицепного канатно-чокерного технологического оборудования при работе на почвогрунтах со слабой несущей способностью.

Заключение. Результатами теоретических исследований установлено, что введение в конструкцию колесной трелевочной машины прицепного канатно-чокерного технологического оборудования позволяет минимизировать показатели динамической нагруженности во время трелевки на почвогрунтах со слабой несущей способностью. Полученные данные могут быть использованы при проектировании колесных агрегатных машин для лесозаготовки на машиностроительных предприятиях.

Список литературы

1. Вырко Н. П. Сухопутный транспорт леса. Минск: БГТУ, 2003. 438 с.

2. Матвейко А. П., Клоков Д. В., Протас П. А. Технология и оборудование лесосечных и лесоскладских работ. Практикум. Минск: БГТУ, 2013. 199 с.

3. Протас П. А., Клоков Д. В. Аналитическое исследование процесса взаимодействия колесных трелевочных машин с пачкой хлыстов и волоком // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 5–4. С. 256–260. DOI: 10.12737/7110.

4. Кононов А. М. Исследование реализации тягово-сцепных качеств и агротехнической проходимости колесных тракторов на суглинистых почвах Беларуси: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Горки: БСХА, 1974. 41 с.

5. Гапоненко В. С. О путях снижения уплотняющего воздействия машинно-тракторных агрегатов на почву // Влияние сельскохозяйственной техники на почву: труды Почвенного ин-та им. В. В. Докучаева. М., 1981. С. 5661.

6. Соколова В. А., Петров И. П. Исследование взаимодействия арочного колеса с опорной поверхностью // Труды НАМИ. 1962. Вып. 54. С. 64–72.

7. Хайлис Г. А. К теории качения пневматического колеса // Тракторы и сельхозмашины. 1963. № 3. С. 5–7.

8. Симанович В. А., Демидов В. А., Клоков Д. В. Колеса и шины лесных и лесотранспортных машин. Минск: БГТУ, 2005. 84 с.

9. Симанович В. А., Исаченков В. С. Оценка тягово-сцепных свойств трелевочных тракторов с усовершенствованной конструкцией несущей системы // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2009. Вып. XVII. С. 116–119.

10. Исаченков В. С., Симанович В. А. Обоснование параметров канатно-чокерного технологического оборудования // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 39–42.

11. Исаченков В. С., Симанович В. А. Обоснование параметров прицепного технологического оборудования колесных трелевочных машин // Труды БГТУ. 2016. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 23–27.

References

1. Vyrko N. P. *Sukhoputnyy transport lesa* [Forest land transport]. Minsk, BGTU Publ., 2003. 438 p.

2. Matveyko A. P., Klokov D. V., Protas P. A. *Tekhnologiya i oborudovanie lesosechnykh i lesoskladskikh rabot. Praktikum* [Technology and equipment for logging and landing works. Practical work]. Minsk, BGTU Publ., 2013. 199 p.

3. Protas P. A., Klokov D. V. Analytical study of the interaction of wheel skidder with a bundle of stems and portage. *Recent research trends of the XXI century: theory and practice*, 2014, vol. 2, no. 5–4, pp. 256–260. DOI: 10.12737/7110.

4. Kononov A. M. *Issledovaniye realizatsii tyagovo-stsepnykh kachestv i agrotekhnicheskoy prokhodimosti kolesnykh traktorov na suglinistykh pochvakh Belarusi: aftoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Investigation of the realization of traction-coupling qualities and agrotechnical patency of wheeled tractors on loamy soils in Belarus. Abstract of thesis DSc (Engineering)]. Gorki, BSHA Publ., 1974. 41 p.

5. Gaponenko V. S. On ways to reduce the sealing effect of machine-tractor aggregates on the soil. *Trudy Pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchaeva "Vliyaniye sel'skokhoxyaystvennoy tekhniki na pochvu"* [Proceedings of Soil Institute] named after V. V. Dokuchaev "Influence of agricultural machinery on soil"], 1981, p. 5661 (In Russian).

6. Sokolova V. A., Petrov I. P. Study of the interaction of an arched wheel with a supporting surface. *Trudy NAMI* [Proceedings of NAMI], 1962, issue 54, pp. 64–72 (In Russian).

7. Haylis G. A. To the theory of the rolling of a pneumatic wheel. *Tractory i sel'khozmashiny* [Tractors and agricultural machinery], 1963, no. 3, pp. 5–7 (In Russian).

8. Simanovich V. A., Demidov V. A., Klokov D. V. *Kolesa i shiny lesnykh i lesotransportnykh mashin* [Wheels and tires forestry and transport machine]. Minsk, BGTU Publ., 2005. 84 p.

9. Simanovich V. A., Isachenkov V. S. Evaluation of traction characteristics skidders with advanced design support system. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 2, Forest and Woodworking Industry, 2009, issue 17, pp. 116–119 (In Russian).

10. Isachenkov V. S., Simanovich V. A. Rope-choker trailed implements determination of parameters. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 39–42 (In Russian).

11. Isachenkov V. S., Simanovich V. A. Substantiation of the parameters of tow technology equipment wheeled skidders. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 23–27 (In Russian).

Информация об авторах

Исаченков Владимир Сергеевич – старший преподаватель кафедры инженерной графики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: v.isachenkov@belstu.by

Симанович Василий Антонович − кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lmitlz@belstu.by

Information about the authors

Isachenkov Vladimir Sergeevich – Senior Lecturer, the Department of Engineering Drawing. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.isachenkov@belstu.by

Simanovich Vasiliy Antonovich − PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lmitlz@belstu.by

Поступила 03.03.2020

УДК 630*377.4

В. С. Исаченков, В. А. Симанович
Белорусский государственный технологический университет

К ВОПРОСУ ВЛИЯНИЯ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ КОЛЕСНЫХ ТРЕЛЕВОЧНЫХ МАШИН

В настоящее время встал вопрос повышения производительности колесных трелевочных машин при выполнении лесосечных работ в конкретных природно-климатических условиях на грунтах со слабой несущей способностью. Поставленная задача может быть достигнута совершенствованием конструкции как самой машины, так и технологического оборудования. В статье проведен анализ основных проблемных моментов существующих технологических схем заготовки древесного сырья при рубках главного и промежуточного пользования с применением колесных трелевочных машин, оснащенных канатно-чокерным технологическим оборудованием.

Для решения поставленной задачи авторами проделаны эксплуатационно-технологические испытания колесной трелевочной машины, в основу которых положен метод фотохронометрирования операций рабочего процесса. Обоснован наиболее рациональный вариант конструкции технологического оборудования для увеличения производительности колесной трелевочной машины в конкретных природно-климатических условиях. На основе результатов проделанных испытаний авторами была получена регрессионная зависимость сменной производительности колесной трелевочной машины от объема трелюемой пачки хлыстов и длины трелевочного волока. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и изготовлении колесных трелевочных машин для лесозаготовок на предприятиях Республики Беларусь.

Ключевые слова: производительность, колесная трелевочная машина, технологическое оборудование.

V. S. Isachenkov, V. A. Simanovich
Belarusian State Technological University

TO THE QUESTION OF THE INFLUENCE OF NATURAL-CLIMATIC CONDITIONS ON THE PRODUCTIVITY OF SKIDDERS

At present, the question has arisen of increasing the productivity of wheeled skidders when performing logging operations in specific climatic conditions on soils with weak bearing capacity. The task can be achieved by improving the design of both the machine itself and technological equipment.

The article analyzes the main problem points of the existing technological schemes for the procurement of wood raw materials for cutting primary and intermediate use with the use of wheeled skidders equipped with cable-choker technological equipment.

To solve this problem, the authors performed operational and technological tests of a skidding wheel machine, which are based on the method of photo-timing of workflow operations. The most rational version of the design of technological equipment for increasing the performance of a wheel skidder in specific climatic conditions is substantiated. Based on the results of the tests, the authors obtained a regression dependence of the interchangeable performance of the wheel skidder on the volume of the skid bundle of whips and the length of the skid. The results can be used in the design and manufacture of forest logging machines for logging at enterprises of the Republic of Belarus.

Key words: productivity, skidder, technological equipment.

Введение. Сменная производительность колесных трелевочных машин зависит как от конструкции самой машины, так и от природно-климатических условий лесозаготовки, которая включает в себя взаимосвязанные последовательные операции: валка деревьев; обрезка сучьев; при необходимости раскряжевка на том или ином этапе; трелевка; последующая вывозка древесного сырья потребителям.

На сегодняшний момент большинство операций выполняются комплексами машин и механизмов, однако для значительной части лесосечного фонда, расположенного в особых природно-климатических условиях на грунтах со слабой несущей способностью, остается открытым вопрос целесообразного способа трелевки [1–9].

В трелевку включаются холостой ход трелевочного трактора, формирование пачки деревьев или хлыстов, их подъем, рабочий ход и разгрузка на погрузочном пункте [10, 11].

На заготовке древесного сырья в Республике Беларусь в указанных природно-климатических

условиях работы в настоящее время используются колесные трелевочные тракторы с канатно-чокерным технологическим оборудованием, в частности ТТР-401. Для преодоления указанных участков трелевочных или магистральных волоков со слабой несущей способностью почвогрунта при буксовании для этих машин во время рабочего цикла используется прием сброса пачки с последующим ее подтаскиванием.

На наш взгляд, одним из основных путей дальнейшего повышения производительности труда колесных трелевочных тракторов при работе на почвогрунтах с низкой несущей способностью является усовершенствование технологического оборудования.

В качестве решения данной задачи предлагается изменить конструкцию технологического оборудования установкой дополнительной опорной оси, что позволяет использовать его в качестве как навесного, так и прицепного варианта. В начальный момент буксования технологическое оборудование переводится из навесного положения в прицепное, и колесный трелевочный трактор преодолевает проблемный участок, не теряя темпа работы. После преодоления указанного участка технологическое оборудование переводится в навесное положение. Это позволит существенно повысить производительность труда указанных машин в конкретных природно-климатических условиях.

Цель работы – проведение эксплуатационно-технологических испытаний и определение влияния природно-климатических условий на производительность колесной трелевочной машины, оснащенной различным по конструктивным особенностям технологическим оборудованием [12].

Основная часть. Для проведения эксплуатационно-технологических испытаний в качестве колесной трелевочной машины использовался трелевочный трактор ТТР-401, на котором устанавливалось как стандартное, так и усовершенствованное технологическое оборудование, разработанное на основе проведенных ранее исследований. Технологическая схема испытаний предусматривала использование бензиномоторных пил на валке, обрезке сучьев и трелевочного трактора на сборе и трелевке хлыстов на погрузочный пункт.

В основу испытаний положен метод фотохронометрирования операций рабочего процесса. Данные заносились в таблицу технологического цикла работы машины с указанием наименования груза, его характеристики, технологической схемы работы машины, среднего расстояния трелевки, длины участков со слабой несущей способностью почвогрунтов, условий сбора и разгрузки хлыстов, характеристики лесосеки, состояния рельефа местности и дороги, способов валки деревьев и пр.

Расстояние трелевки и всех вспомогательных перемещений определялось путем замера пути движения с использованием шагомера. Время фиксировалось с помощью секундомера и часов. Продолжительность испытаний была определена в объеме не менее 3 контрольных смен работы. Установлено не менее 15 контрольных наблюдений (рейсов) в каждой смене. Разница в продолжительности для определения зачетности получаемых результатов составляла не более 10%. Согласно правилам таксации леса объем пачки хлыстов определялся по результатам замера длины хлыстов и их диаметров в комлевой части.

Эксплуатационно-технологические испытания проводились на рубках главного пользования на различных режимах работы в процессе трелевки (тип местности согласно СТБ 1342-2002 – 3; породный состав – 5Б10с1С3Е+Олч; средний запас леса на га, $м^3$ – 236; средний объем хлыста, $м^3$ – 0,24; тип леса – 1а кисличный, плотность – 0,7; средний возраст леса – 70 лет). Длина пасечного волока составляла от 150 до 300 м, а величина проблемных участков на пасечных волоках колебалась в пределах 50 м. Объем трелюемой пачки хлыстов варьировался от 0,2 до 2,0 $м^3$. Скорость перемещения трактора – от 4,57 до 8,53 км/ч с использованием четырех передач.

Производительность трелевочного трактора ТТР-401 определялась по выражению

$$П_{СМ} = \frac{(T - t_{ПЗ}) \cdot V_{П} \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_К}{t_Ц}, \quad (1)$$

где $П_{СМ}$ – сменная производительность, $м^3$; T – продолжительность смены, с; $t_{ПЗ}$ – время на подготовительно-заключительные операции, с; $V_П$ – объем трелюемой пачки, $м^3$; φ_1 – коэффициент использования рабочего времени; $\varphi_К$ – коэффициент природно-климатических условий; $t_Ц$ – время рабочего цикла, с.

В свою очередь время рабочего цикла было найдено расчетным путем:

$$t_Ц = t_О + t_{РХО} + t_{ХХ} + t_{ПР}, \quad (2)$$

где $t_О$ – время на сброс пачки и маневрирования, с; $t_{РХО}$ – общее время на движение машины в грузовом направлении, с; $t_{ХХ}$ – время на движение машины в порожнем направлении, с; $t_{ПР}$ – время на сбор пачки, с.

Значение общего времени движения в грузовом направлении определялось из выражения:

$$t_{РХО} = t_{РХ} \cdot n_{РХ} + t_{СП} \cdot n_{СП}, \quad (3)$$

где $t_{РХ}$ – время на движение машины в грузовом направлении, с; $n_{РХ}$ – количество участков движения машины в грузовом направлении; $t_{СП}$ – время на сброс пачки с последующим ее подтаскиванием; $n_{СП}$ – количество участков со слабой несущей способностью почвогрунта.

Таблица 1

Средние значения временных величин рабочего цикла для трелевочного трактора ТТР-401 со стандартным технологическим оборудованием при длине трелевки 150 м

Среднее значение, с	Объем пачки, м^3		
	0,2–0,8	0,8–1,4	1,4–2,0
$t_О$	89 с / 16,4%	94 с / 16,9%	96 с / 15,7%
$t_{РХО}$	231 с / 42,5%	233 с / 41,9%	243 с / 39,7%
$t_{ХХ}$	104 с / 19,2%	99 с / 17,8%	102 с / 16,7%
$t_{ПР}$	119 с / 21,9%	130 с / 23,4%	171 с / 27,9%

В табл. 1 и 2 представлены средние значения и процентное соотношение временных величин рабочего цикла, указанные в уравнениях (1)–(3), при использовании стандартного и усовершенствованного технологического оборудования на участках со слабой несущей способностью при длине трелевки 150 м.

Таблица 2

Средние значения временных величин рабочего цикла для трелевочного трактора ТТР-401 с усовершенствованным технологическим оборудованием при длине трелевки 150 м

Среднее значение, с	Объем пачки, м^3		
	0,2–0,8	0,8–1,4	1,4–2,0
$t_О$	91 с / 21,5%	93 с / 21,0%	97 с / 19,9%
$t_{РХО}$	111 с / 26,2%	116 с / 26,2%	119 с / 24,4%
$t_{ХХ}$	102 с / 24,0%	101 с / 22,9%	102 с / 20,9%
$t_{ПР}$	120 с / 28,3%	132 с / 29,9%	170 с / 34,8%

Значения и процентное соотношение временных величин рабочего цикла при использовании стандартного и усовершенствованного технологического оборудования на участках со слабой несущей способностью при длине трелевки 300 м представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Средние значения временных величин рабочего цикла для трелевочного трактора ТТР-401 со стандартным технологическим оборудованием при длине трелевки 300 м

Среднее значение, с	Объем пачки, м^3		
	0,2–0,8	0,8–1,4	1,4–2,0
$t_О$	72 с / 9,4%	79 с / 9,9%	84 с / 10,0%
$t_{РХО}$	364 с / 47,6%	377 с / 46,1%	391 с / 47,7%
$t_{ХХ}$	214 с / 28,1%	213 с / 25,4%	216 с / 26,9%
$t_{ПР}$	114 с / 14,9%	122 с / 18,6%	158 с / 15,4%

Таблица 4

Средние значения временных величин рабочего цикла для трелевочного трактора ТТР-401 с усовершенствованным технологическим оборудованием при длине трелевки 300 м

Среднее значение, с	Объем пачки, м^3		
	0,2–0,8	0,8–1,4	1,4–2,0
$t_О$	73 с / 11,2%	78 с / 11,6%	85 с / 11,7%
$t_{РХО}$	245 с / 37,7%	254 с / 37,9%	274 с / 37,6%
$t_{ХХ}$	217 с / 33,4%	214 с / 31,9%	215 с / 29,5%
$t_{ПР}$	115 с / 17,7%	125 с / 18,6%	155 с / 21,2%

Полученные значения фотохронометрирования операций рабочего цикла ТТР-401 позволили убедиться в том, что наибольшие потери времени происходят во время движения в грузовом направлении для трактора с серийным технологическим оборудованием.

В дальнейшем при обработке результатов, полученных по формуле (1), методами математической статистики в системе высокоуровневого программирования MATLAB 7.11.0 (*R*2010*b*) была получена регрессионная зависимость сменной производительности от $V_П$ и длины трелевочного волока $L_Т$ (м):

$$П_{СМ} = P_{00} + P_{10} \cdot V_П + P_{01} \cdot L_Т + \\ + P_{20} \cdot V_П^2 + P_{11} \cdot V_П \cdot L_Т + P_{02} \cdot L_Т^2. \quad (4)$$

Коэффициенты регрессии, использованные в формуле (4) для конкретных природно-климатических условий, рассматриваемых нами, представлены в табл. 5.

Таблица 5

Коэффициенты регрессии

Технологическое оборудование	Коэффициенты регрессии					
	P_{00}, $м^3 \cdot см^{-1}$	P_{10}, $см^{-1}$	P_{01}, $м^2 \cdot см^{-1}$	P_{20}, $см^{-1} \cdot м^{-3}$	P_{11}, $м^{-1} \cdot см^{-1}$	P_{00}, $м \cdot см^{-1}$
Стандартное	3,935	45,86	$-5.072 \cdot 10^{-2}$	–1,08	$-6{,}587 \cdot 10^{-2}$	$1{,}346 \cdot 10^{-4}$
Усовершенствованное	12,13	75,17	$1{,}562 \cdot 10^{-1}$	–2,807	$-1{,}346 \cdot 10^{-1}$	$4{,}111 \cdot 10^{-4}$

На основе изложенного и выполненных ранее работ можно сделать вывод о целесообразности выбора усовершенствованного технологического оборудования для колесных трелевочных машин при работе в конкретных природно-климатических условиях эксплуатации.

Заключение. Представленными результатами проведенных производственных испытаний установлено, что природно-климатические условия существенным образом влияют на производительность работы колесных трелевочных машин, которая может быть существенно повышена за счет усовершенствования технологического оборудования.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и изготовлении технологического оборудования колесных трелевочных машин для лесозаготовок на машиностроительных предприятиях Республики Беларусь.

Список литературы

1. Кононов А. М. Исследование реализации тягово-сцепных качеств и агротехнической проходимости колесных тракторов на суглинистых почвах Беларуси: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Горки: Белорус. с.-х. акад., 1974. 41 с.

2. Гапоненко В. С. О путях снижения уплотняющего воздействия машинно-тракторных агрегатов на почву // Влияние сельскохозяйственной техники на почву: труды Почвенного ин-та им. В. В. Докучаева. М., 1981. С. 56–61.

3. Соколова В. А., Петров И. П. Исследование взаимодействия арочного колеса с опорной поверхностью // Труды НАМИ. 1962. Вып. 54. С. 64–72.

4. Хайлис Г. А. К теории качения пневматического колеса // Тракторы и сельхозмашины. 1963. № 3. С. 5–7.

5. Симанович В. А., Демидов В. А., Клоков Д. В. Колеса и шины лесных и лесотранспортных машин. Минск: БГТУ, 2005. 84 с.

6. Симанович В. А., Исаченков В. С. Оценка тягово-сцепных свойств трелевочных тракторов с усовершенствованной конструкцией несущей системы // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2009. Вып. XVII. С. 116–119.

7. Протас П. А., Клоков Д. В. Аналитическое исследование процесса взаимодействия колесных трелевочных машин с пачкой хлыстов и волоком // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 5–4. С. 256–260.

8. Исаченков В. С., Симанович В. А. Обоснование параметров канатно-чокерного технологического оборудования // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 39–42.

9. Лесной фонд [Электронный ресурс] // Сайт Министерства лесного хозяйства. URL: http://www.mlh.by/ru/forestry/ resources.html (дата обращения: 18.02.2019).

10. Вырко Н. П. Сухопутный транспорт леса. Минск: БГТУ, 2003. 438 с.

11. Матвейко А. П., Клоков Д. В., Протас П. А. Технология и оборудование лесосечных и лесоскладских работ. Практикум. Минск: БГТУ, 2013. 199 с.

12. Исаченков В. С., Симанович В. А. К вопросу оценки эффективности работы колесной трелевочной машины на почвогрунтах со слабой несущей способностью // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2019. № 2 (222). С. 191–196.

References

1. Kononov A. M. *Issledovaniye realizatsii tyagovo-stsepnykh kachestv i agrotekhnicheskoy prokhodimosti kolesnykh traktorov na suglinistykh pochvakh Belarusi: aftoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Investigation of the realization of traction-coupling qualities and agrotechnical patency of wheeled tractors on loamy soils in Belarus. Abstract of thesis DSc (Engineering)]. Gorki, 1974. 41 p.

2. Gaponenko V. S. On ways to reduce the sealing effect of machine-tractor aggregates on the soil. *Trudy Pochvennogo institute im. V. V. Dokuchaeva "Vliyaniye sel'skokhozyaystvennoy tekhniki na pochvu"*

[Proceedings of Soil Institute named after V. V. Dokuchaev “Influence of agricultural machinery on soil”], 1981, p. 5661 (In Russian).

3. Sokolova V. A., Petrov I. P. Study of the interaction of an arched wheel with a supporting surface. *Trudy NAMI* [Proceedings of NAMI], 1962, issue 54, pp. 64–72 (In Russian).

4. Khaylis G. A. To the theory of the rolling of a pneumatic wheel. *Tractory i sel'khozmashiny* [Tractors and agricultural machinery], 1963, no. 3, pp. 5–7 (In Russian).

5. Simanovich V. A., Demidov V. A., Klokov D. V. *Kolesa i shiny lesnykh i lesotransportnykh mashin* [Wheels and tires forestry and transport machine]. Minsk, BGTU Publ., 2005. 84 p.

6. Simanovich V. A., Isachenkov V. S. Evaluation of traction characteristics skidders with advanced design support system. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 2, Forest and Woodworking Industry, 2009, issue 17, pp. 116–119 (In Russian).

7. Protas P. A., Klokov D. V. Analytical study of the interaction of wheel skidder with a bundle of stems and portage. *Recent research trends of the XXI century: theory and practice*, 2014, vol. 2, no. 5–4, pp. 256–260. DOI: 10.12737/7110.

8. Isachenkov V. S., Simanovich V. A. Rope-choker trailed implements determination of parameters. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 39–42 (In Russian).

9. *Lesnoy fond* [Forest estate]. Available at: http://www.mlh.by/ru/forestry/resources.html (accessed 18.02.2019).

10. Vyrko N. P. *Suhoputnyy transport lesa* [Forest land transport]. Minsk, BGTU Publ., 2003. 438 p.

11. Matveyko A. P., Klokov D. V., Protas P. A. *Tekhnologiya i oborudovanie lesosechnykh i lesoskladskikh rabot. Praktikum* [Technology and equipment for logging and landing works. Practical work]. Minsk, BGTU Publ., 2013. 199 p.

12. Isachenkov V. S., Simanovich V. A. To question of estimation of efficiency of work of the skidder on soils with weak bearing strength *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forestry, Nature Management and Processing of Renewable Resources, 2019, no. 2 (222), pp. 191–196 (In Russian).

Информация об авторах

Исаченков Владимир Сергеевич – старший преподаватель кафедры инженерной графики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: v.isachenkov@belstu.by.

Симанович Василий Антонович − кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lmitlz@belstu.by.

Information about the authors

Isachenkov Vladimir Sergeevich – Senior Lecturer, the Department of Engineering Drawing. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.isachenkov@belstu.by

Simanovich Vasiliy Antonovich − PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lmitlz@belstu.by

Поступила 05.03.2020

ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

УДК 685.363.22.2

А. В. Полховский, С. А. Прохорчик, С. В. Шетько, Е. В. Ручкина
Белорусский государственный технологический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СПОРТИВНО-БЕГОВЫХ ПЛАСТИКОВЫХ ЛЫЖ

Содержание статьи посвящено исследованию материалов, входящих в состав конструкции беговых лыж.

В статье проведен обзор основных материалов, входящих в состав спортивно-беговых пластиковых лыж. Для верхнего декоративного слоя используются в основном АБС-пластики. Для скользящего слоя применяют полиэтилен. Для среднего клина может быть использована древесина, сотовый заполнитель, вспененный заполнитель или различные комбинации этих материалов. Для придания лыжам высокой жесткости могут применятся армирующие материалы, такие как стекловолокно, углеволокно, арамид.

В статье приведены результаты исследований лыж нескольких известных мировых производителей. В данных образцах лыж был проведен анализ породного состава древесины клина. Проведена идентификация химического состава и определена температура плавления скользящих полимерных материалов, входящих в состав лыж. Анализ породного состава проводился при помощи оптического микроскопа, идентификация химического состава проводилась методом инфракрасной спектроскопии, температура плавления скользящих полимерных слоев лыж определялась методом дифференциальной сканирующей калориметрии.

На основание обзора материалов в открытых источниках и результатов проведенных исследований образцов спортивно-беговых пластиковых лыж иностранных производителей определены самые распространенные материалы, входящие в состав спортивно-беговых пластиковых лыж. К ним относятся древесина лиственных пород, полиэтилен, АБС-пластик, эпоксидная смола и стекловолокно.

Целью данной статьи является изучение современных материалов, используемых при изготовлении спортивно-беговых пластиковых лыж, для подбора и изготовления возможных отечественных аналогов.

Ключевые слова: лыжи, древесина, пластик, полиэтилен, стеклоткань, эпоксидная смола.

A. V. Polkhovskiy, S. A. Prokhorchik, S. V. Shet'ko, E. V. Ruchkina
Belarusian State Technological University

RESEARCH OF MATERIALS USED FOR MANUFACTURING SPORTS-RUNNING PLASTIC SKIS

The content of the article is devoted to the study of materials included in the design of cross-country skiing.

The article provides an overview of the basic materials that make up sports-running plastic skis. For the upper decorative layer, ABS plastics are mainly used. For the sliding layer, polyethylene is used. For an average wedge, wood, honeycomb aggregate, foamed aggregate, or various combinations of these materials may be used. Reinforcing materials such as fiberglass, carbon fiber, aramid can be used to give the ski high rigidity.

The article presents the results of ski studies of several world famous manufacturers. In these ski samples, an analysis was made of the species composition of the wedge wood. The chemical composition has been identified and the melting temperature of the sliding polymer materials that make up the skis has been determined. The analysis of the breed composition was carried out using an optical

microscope, the chemical composition was identified by infrared spectroscopy, the melting temperature of the sliding polymer layers of the skis was determined by differential scanning calorimetry.

Based on a review of materials in open sources and the results of studies of samples of sports-running plastic skis of foreign manufacturers, the most common materials that are part of sports-running plastic skis are identified. These include hardwood, polyethylene, ABS plastic, epoxy and fiberglass.

The purpose of this article is to study modern materials used in the manufacture of sports-running plastic skis for the selection and manufacture of possible domestic analogues.

Key words: skis, wood, plastic, polyethylene, fiberglass, epoxy.

Введение. Лыжи – это изделие, предназначенное для передвижения по снегу, представляющее собой две длинные планки с загнутыми и заостренными носками.

Существует много разновидностей лыж, например: горные, спортивно-беговые, гоночные, туристические. Они имеют примерно одинаковые конструкции, а именно клееные многослойные, что наиболее выгодно с эксплуатационной, технологической и экономической точек зрения. Это связано с тем, что к лыжам предъявляют в определенной мере противоречивые требования – максимальная прочность при минимальной массе и высокой упругости [1]. Применение конструкции, состоящей из слоев, изготовленных из различных материалов, позволяет обеспечить решение этой задачи.

Существует множество конструкций лыж, имеющих различия в количестве, конфигурации слоев, применяемых материалах и технологии изготовления.

Целью данной статьи является изучение современных материалов, используемых при изготовлении спортивно-беговых пластиковых лыж, для подбора и изготовления возможных отечественных аналогов.

Основная часть. Основными материалами, из которых изготавливают лыжи, являются пластик и древесина, но деревянные лыжи на сегодняшний момент почти полностью ушли в прошлое. Это связано с тем, что пластик по сравнению с древесиной обладает рядом существенных преимуществ. К таким преимуществам можно отнести то, что пластик не впитывает в себя влагу и, соответственно, не трескается в результате многократных намоканий и высыханий, пластик более прочный и пластичный, обладает большей долговечностью. Также следует учесть такое преимущество пластика, как легкость по сравнению с древесиной. Низкая масса лыжи имеет высокое значение для соревнований. На данный момент единственным конструктивным элементом лыжи, в котором используется древесина, является клин.

Современные лыжи представляют собой высокотехнологичные конструкции, в основе которых лежит сочетание современных материалов и высоких технологий, позволяющих без снижения жесткости и прочности достигнуть минимального значения массы [2]. Для этого каждый слой спортивно-беговой лыжи выполняется из материала, обладающего определенными свойствами. На рис. 1 приведено изображение структуры лыжи.

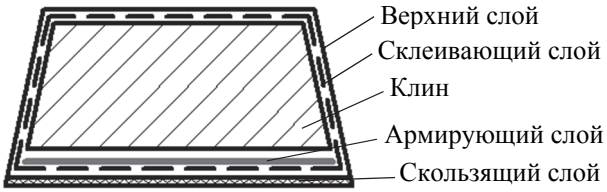


Рис. 1. Внутренняя структура лыжи

Верхний слой лыжи, служащий защитой для клина и основой для нанесения рисунков, выполняется из пластика. Одна из крупных компаний на рынке пластиковых композиционных материалов австрийская компания ISOSPORT производит несколько линеек поверхностных пленок (ISOCAP), предназначенных для изготовления лыж. Данные пленки можно разделить на две группы: прозрачные и непрозрачные. Они обладают необходимыми механическими и температурными свойствами. Также следует отметить высокие адгезионные свойства с системами эпоксидных смол, что имеет важное значение при склеивании лыжи. Геометрические свойства (перекашивание, плоскостность) обеспечивают необходимые условия обработки во время изготовления лыж [3].

Для изготовления скользящего слоя (базы) лыжи применяется полиэтилен. На сегодняшний момент существует два типа технологий получения скользящей поверхности: extruded (получаемая прогонкой через валики расплавленной массы полиэтилена) и sintered (спекание из мелкогранулированного полиэтилена) [4].

Первая база не требует практически никакого ухода и легко ремонтируется: царапины

на ней заделываются расплавленной полиэтиленовой свечкой. Такая база имеет очень низкую себестоимость [4].

Компания ISOSPORT (Австрия) имеет большой выбор экструдированных и спеченных лыжных баз. Продукция компании состоит из восьми семейств лыжных баз (ISOSPEED) [5].

Для придания дополнительной жесткости в конструкции лыж предусматривают применение армирующих материалов. К ним относят специальные ткани: стекловолокно, углеволокно, арамид. Для требуемого распределения жесткости использует ткани с различным направлением волокон. Продольное расположение волокон ткани задает продольную жесткость, а также повышает прочность лыжи на излом. Диагональное расположение волокон позволяет добиться усиления торсионной жесткости, почти не затрагивая продольную [6].

Фирма HEXCEL (США) является крупным мировым производителем композиционных материалов. В частности, интерес представляют препреги HexPly с армированием HexForce: мультиоксиальными тканями или однонаправленными материалами в различной форме [7].

Клин лыжи является ее основой. Он обладает большим выбором вариантов конструкций с применением широкого перечня материалов. Конструкция и материал клина зависят в первую очередь от уровня лыжи и фирмы-производителя, так как на сегодняшний момент существует большое число лыжных брендов, каждый из которых обладает собственной линейкой конструкций. Среди материалов для клина можно выделить древесину, гофрокартон (для сотового сердечника), пенополиуритан (сердечник из вспененных материалов). Также клин может представлять собой комбинацию из нескольких материалов.

Важным моментом при исследовании материалов для разработки конструкции лыжи является изучение уже существующих аналогов. Для этих целей были взяты образцы лыж трех крупных производителей: № 1, 2, 3.

В указанных образцах были проведены анализ пород древесины и идентификация химического состава и температуры плавления скользящих полимерных слоев, входящих в состав образцов.

Определение породного состава проводилось при помощи оптического микроскопа. В ходе эксперимента оценивали продольные и поперечные срезы выбранных образцов, которые были выпилены на круглопильном станке. На рис. 2, 3 и 4 представлены поперечные срезы образцов лыж.

Рис. 2. Поперечный срез образца № 1

Анализ породного состава образца № 1 показал, что деревянная часть лыжи была изготовлена из древесины осины.

Анализ породного состава образца № 2 показал, что деревянная часть лыжи состоит из трех разных пород древесины, а именно бука, тополя и березы.

Как видно на рисунке, внутренняя часть образца № 2 представляет собой слоистую конструкцию из нескольких пород древесины, для снижения массы лыжи в клине сделаны пропилы.

Рис. 3. Поперечный срез лыжи образца № 2

Анализ поперечного среза образца № 3 показал, что внутренняя часть лыжи имеет комбинированную структуру. Клин состоит из слоя разнотолщинного бумажного ячеистого наполнителя (гофрокартона), к которому приклеены ламели, изготовленные из древесины осины.

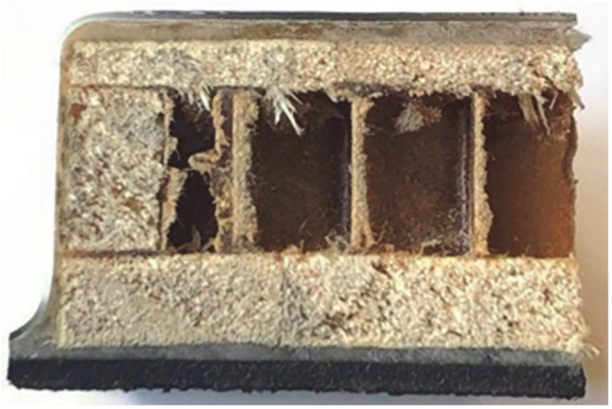


Рис. 4. Поперечный срез образца № 3

Как видно из результатов исследования, во всех образцах в конструкции клина применяется древесина, в двух из них использовалась древесина осины. Это может быть вызвано тем, что осина обладает низкой плотностью (около 500 кг/м^3), которая влияет на массу лыжи, и однородной структурой.

Для исследование химического состава материалов применялся метод *инфракрасной спектроскопии*. Исследования проводились при помощи ИФ микроскопа Nicolet iN-10, Thermo Nicolet.

Согласно результатам исследований образца № 1, в качестве материала для клина использовалась древесина лиственных пород. Древесина применялась в качестве формообразующего материала и для жесткости самой лыжи. Для придания лыже жесткости и прочности в продольном направлении применялся слой стеклоткани. Основными компонентами в составе стекловолокна в пересчете на оксиды являются: SiO_2 – 63,19 мас. %; CaO – 21,13 мас. %; Al_2O_3 – 15,67 мас. %.

В качестве клея использована эпоксидная смола. Покрытие верхней части представляет собой сополимер полиэтилена и полипропилена. Основу скользящей поверхности лыжи составляет полиэтилен. Полимерные вставки в носке и пятке изготовлены из АБС-пластика.

На рис. 5 приведены структура и состав армирующего слоя образца № 1.

Для придания прочности и жесткости в продольном направлении используется слой стеклоткани. Основными компонентами в составе стекловолокна в пересчете на оксиды являются: SiO_2 – 55,46 мас. %; CaO – 33,41 мас. %; Al_2O_3 – 11,13 мас. %.

Исследования образца № 2 показали, что в качестве клина использована древесина лиственных пород. Древесина применялась в качестве формообразующего материала и для жесткости самой лыжи.

Покрытие верхней части представляет собой эпоксидную смолу на основе акрилового полимера. В качестве клея использована фенольная смола. Под слоем краски расположен слой АБС-пластика. Основу скользящей поверхности лыж составляет полиэтилен. Полимерные вставки в носке (длина 7 см) и пятке (длина 2 см) изготовлены из полиамида и АБС-пластика.

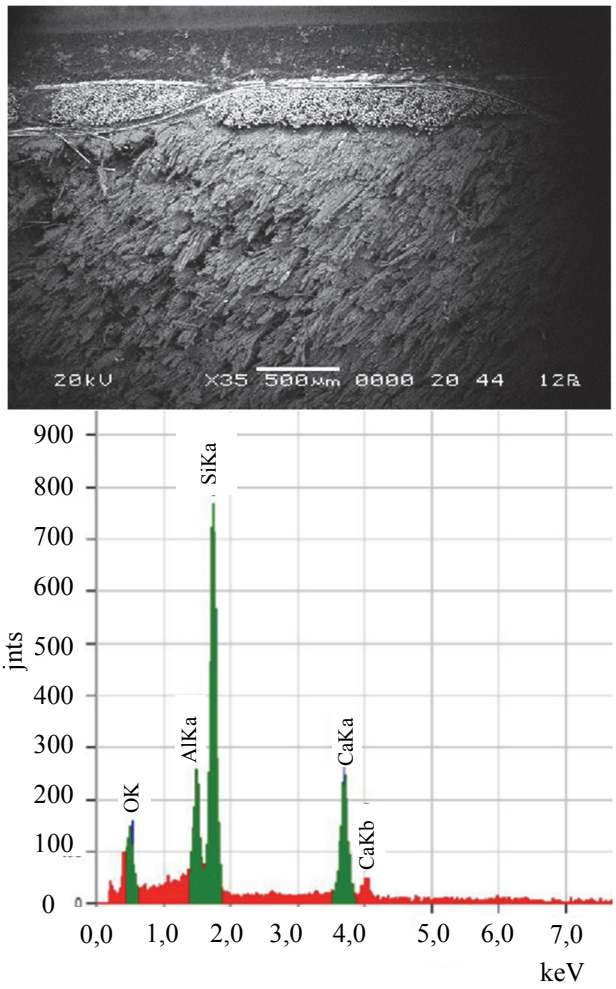


Рис. 5. Структура и состав армирующего слоя образца № 1

На рис. 6 приведены структура и состав армирующего слоя образца № 2.

Образец № 3 имеет клин из сотового материала, основу которого представляет гофрокартон. В качестве несущего слоя использована древесина лиственных пород. Древесина и гофрокартон применяются в качестве формообразующего материала и для жесткости самой лыжи, для придания прочности и жесткости в продольном направлении используется слой стеклоткани. Основными компонентами в составе стекловолокна в пересчете на оксиды являются: Al_2O_3 – 15,65 мас. %; SiO_2 – 62,65 мас. %; CaO – 21,70 мас. %.

В качестве клея использована эпоксидная смола. Покрытие верхней части представляет собой АБС–пластик. Боковая сторона покрыта модифицированным сополимером стирола и акрила. Основу скользящей поверхности составляет полиэтилен. Полимерные вставки в носке (длина 15 см) и пятке (длина 23 см) изготовлены из модифицированного АБС-пластика.

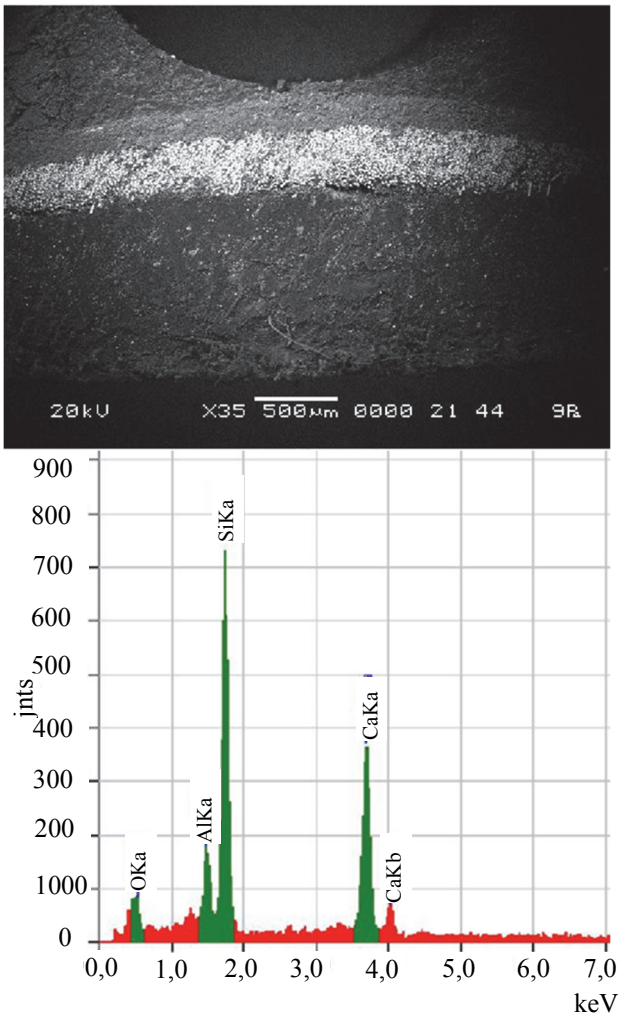


Рис. 6. Структура и состав армирующего слоя образца № 2

На рис. 7 приведены структура и состав армирующего слоя образца № 3.

Температуры плавления скользящих полиэтиленовых слоев лыж определены методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Исследования проводились при помощи термоаналитической системы TGA/DSC-1/1600 HF, Mettler Toledo Instruments.

Температура плавления скользящего слоя образца № 1 составила 139,60°С, образца № 2 – 140,94°С, образца № 3 – 136,84°С.

По результатам испытаний по определению температуры плавления для изготовления лыж применяется сшитый полиэтилен низкого давления (высокой плотности), на сшитую структуру указывает температура плавления ≈140°С.

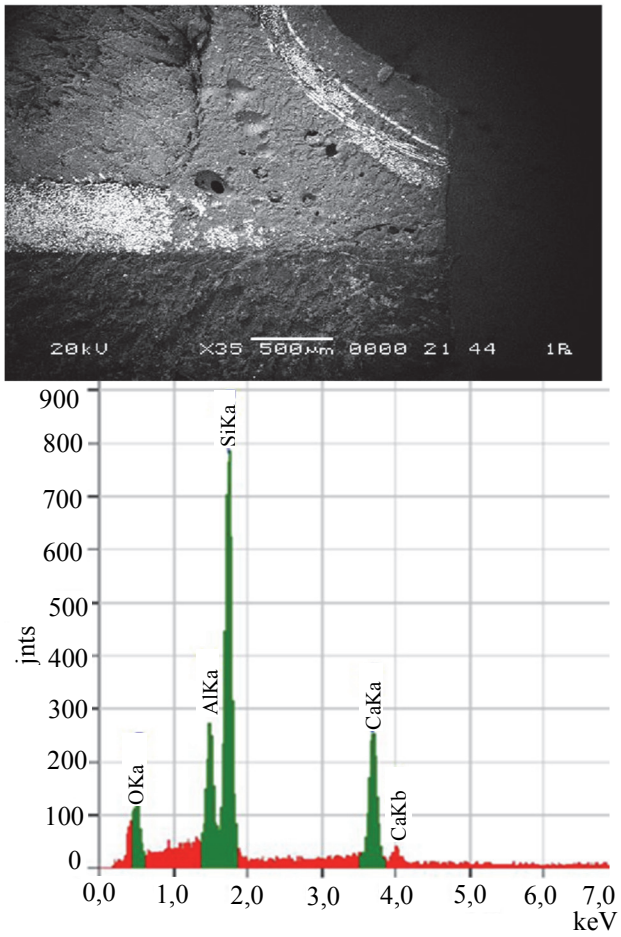


Рис.7. Структура и состав армирующего слоя образца № 3

Заключение. На основании проведенных исследований можно сделать вывод о наиболее распространенных материалах, которые применяются в спортивно-беговых пластиковых лыжах. К ним относятся:

1) древесина лиственных пород, предпочтительно осина;

2) АБС-пластики, вероятно экструзивных марок, которые применяются в пневмоформовании. Точную марку не представляется возможным установить. Существует множество марок АБС-пластика, которые различаются по своим свойствам и способам переработки;

3) эпоксидная смола; после процесса отверждения невозможно установить марку. Также не представляется возможным определить марку отвердителя и его количество;

4) стекловолокно; в Республике Беларусь существует производитель стекловолокна: ОАО «Полоцк-Стекловолокно»;

5) полиэтилен; в конструкциях лыж используется сшитый полиэтилен низкого давления

(полиэтилен высокой плотности). На сшитую структуру указывает температура плавления 140°С.

Несмотря на то что большинство материалов, необходимых при производстве лыж, не производятся в Республике Беларусь, на данный момент в филиале «Телеханы» государственного предприятия «Беларусьторг» налажено производство спортивно-беговых пластиковых лыж из иностранных комплектующих, главным образом таких компаний, как ISOSPORT (Австрия) и HEXCEL (США).

Вместе с этим проводятся работы по импортозамещению зарубежных комплектующих с целью организации производства лыж из отечественного сырья.

Список литературы

1. Производство деревянных лыж [Электронный ресурс] // Все новое и проверенное временем в строительстве и машиностроении. URL: http://www.stroitelstvo-new.ru/drevesina/proizvodstvo-ski.shtml (дата обращения: 03.03.2020).

2. Пластиковые лыжи. Из чего изготавливают скользящую поверхность лыж [Электронный ресурс] // Новая атлетика. URL: https://новая-атлетика.рф/blogplastikovye-lyzhi-iz-chego-izgotavlivayut-skolzyashchuyu-poverkhnost-lyzh/ (дата обращения: 03.03.2020).

3. ISOCAP – Top sheets [Электронный ресурс] // ISOSPORT innovative plastics solutions. URL: https://www.isosport.com/en/categories/isocap (дата обращения: 03.03.2020).

4. Немного о скользячке [Электронный ресурс] // Горнолыжный портал – SKI.RU. URL: https://www.ski.ru/az/blogs/post/nemnogo-o-skolzyachke (дата обращения: 04.03.2020).

5. ISOSPEED – Base materials [Электронный ресурс] // ISOSPORT innovative plastics solutions. URL: https://www.isosport.com/en/categories/isospeed (дата обращения: 04.03.2020).

6. Усиливающие материалы для лыж и сноубордов [Электронный ресурс] // Спорт-Марафон. URL: https://sport-marafon.ru/article/gornye-lyzhi/usilivayushchie-materialy-dlya-lyzh-i-snoubordov/ (дата обращения: 05.03.2020).

7. Препреги и смолы [Электронный ресурс] // HEXCEL. URL: https://www.hexcel.com/Products/Prepregs-and-Resins/HexPly-Prepregs (дата обращения: 05.03.2020).

8. Материалы скользящей поверхности беговых лыж [Электронный ресурс] // Спортивная линия. URL: https://www.skiline.ru/sport-technology/615-ski-base-materials (дата обращения: 05.03.2020).

9. Анатомия лыж [Электронный ресурс] // Беговые лыжи. URL: http://skisport.narod.ru/article/equipsel08.html (дата обращения: 05.03.2020).

10. Конструктивные особенности беговых лыж [Электронный ресурс] // Беговые лыжи. URL: http://102ski.ru/index.php/2009-12-19-15-11-50/15-design-bl (дата обращения: 4.03.2020).

References

1. *Vse novoe i proverennoe vremenem v stroitel'stve i mashinostroenii. Proizvodstvo derevyannykh lyzh* [Everything is new and time-tested in construction and engineering. Wooden ski production]. Available at: http://www.stroitelstvo-new.ru/drevesina/proizvodstvo-ski.shtml (accessed 03.03.2020).

2. *Novaya atletika. Plastikovye lyzhi. Iz chego izgotavlivayut skol'zyashchuyu poverhnost' lyzh* [New Athletics. Plastic skis. What is made of the sliding surface of the ski]. Available at: https://новая-атлетика.рф/blogplastikovye-lyzhi-iz-chego-izgotavlivayut-skolzyashchuyu-poverkhnost-lyzh/ (accessed 03.03.2020).

3. ISOSPORT innovative plastics solutions. ISOCAP – Top sheets. Available at: https://www.isosport.com/en/categories/isocap (accessed 03.03.2020).

4. *Gornolyzhnyj portal – SKI.RU. Nemnogo o skol'zyachke* [Ski portal – SKI.RU. A bit about slippery]. Available at: https://www.ski.ru/az/blogs/post/nemnogo-o-skolzyachke (accessed 04.03.2020).

5. ISOSPORT innovative plastics solutions. ISOSPEED – Base materials. Available at: https://www.isosport.com/en/categories/isospeed (accessed 04.03.2020).

6. *Sport-Marafon. Usilivayushchiye materialy dlya lyzh i snoubordov* [Sport-Marathon. Reinforcing materials for ski and snowboards]. Available at: https://sport-marafon.ru/article/gornye-lyzhi/usilivayushchie-materialy-dlya-lyzh-i-snoubordov/ (accessed 05.03.2020).

7. *HEXCEL. Prepregi i smoly* [HEXCEL. Prepregs and resins]. Available at: https://www.hexcel.com/Products/Prepregs-and-Resins/HexPly-Prepregs (accessed 05.03.2020).

8. *Sportivnaya liniya. Materialy skol'zyashchey poverkhnosti begovykh lyzh* [Sports line. Cross country ski sliding materials]. Available at: https://www.skiline.ru/sport-technology/615-ski-base-materials (accessed 05.03.2020).

9. *Begovye lyzhi. Anatomiya lyzh* [Cross-country skiing. Anatomy of the ski]. Available at: http://skisport.narod.ru/article/equipsel08.html (accessed 05.03.2020).

10. *Begovye lyzhi. Konstruktivnye osobennosti begovyh lyzh* [Cross-country skiing. Design features of crosscountry skiing]. Available at: http://102ski.ru/index.php/2009-12-19-15-11-50/15-design-bl (accessed 04.03.2020).

Информация об авторах

Полховский Антон Викторович – магистр технических наук, аспирант кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: antopolx1@mail.ru

Прохорчик Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент, декан факультета заочного образования. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: prohor@tut.by

Шетько Сергей Васильевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: tidid@belstu.by

Ручкина Елена Васильевна – ассистент кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: helena_slivka@mail.ru

Information about of authors

Polkhovskiy Anton Viktorovich – Master of Engineering, PhD student, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (Sverdlova str., 13a, 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: antopolx1@mail.ru

Prokhorchik Sergey Aleksandrovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Dean of the Faculty of Extramural Studies. Belarusian State Technological University (Sverdlova str., 13a, 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: prohor@tut.by

Shetko Sergey Vasilyevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (Sverdlova str., 13a, 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tidid@belstu.by

Ruchkina Elena Vasil'evna – assistant, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (Sverdlova str., 13a, 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: helena_slivka@mail.ru

Поступила 12.03.2020

УДК 684.62.059

С. В. Шетько, Л. В. Игнатович, С. С. Гайдук, А. С. Чуйков
Белорусский государственный технологический университет

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕЧАТИ ДЛЯ ИМИТАЦИИ ТЕКСТУРЫ ЦЕННЫХ ПОРОД ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МЕБЕЛИ

Создание защитно-декоративных покрытий является заключительной технологической операцией при производстве изделий из древесины и древесных материалов. Использование современных технологий печати позволяет создавать высококачественные покрытия, имитирующие широкий спектр пород древесины. Исследование технологических параметров и свойств используемых материалов определяет эффективность применения технологии.

В статье рассмотрены основные способы печати. Особое внимание уделено методу цифровой фотопечати и оборудованию, позволяющему печатать изображение прямо с компьютера, без дополнительных процессов допечатной подготовки, что значительно экономит время на изготовление продукции. Рассмотрена технология печати и методика создания цифровых изображений текстур ценных пород древесины для ультрафиолетовой печати. В промышленных условиях подготовлены образцы погонажных деталей, окутанных с трех сторон. Исследованы реологические свойства красок ультрафиолетового отверждения для глубокой печати и цифровой фотопечати. Проведена оценка влияния температуры на кинематическую вязкость испытуемых материалов. На основании полученных результатов выбрана краска с наиболее стабильными параметрами, позволяющая достичь требуемого качества печати, а также рекомендован оптимальный температурный режим окружающей среды в процессе создания защитно-декоративных покрытий.

Ключевые слова: технология печати, имитация, текстура, краска, вязкость.

S. V. Shet'ko, L. V. Ignatovich, S. S. Haiduk, A. S. Chuikov
Belarusian State Technological University

APPLICATION OF PRINTING TECHNOLOGY TO IMITATE THE TEXTURE OF PRECIOUS WOOD IN THE FURNITURE PRODUCTION

The creation of protective and decorative coatings is the final technological operation in the production of wood products and wood materials. The use of modern printing technologies allows you to create high-quality coatings that mimic a wide range of wood species. The study of technological parameters and properties of the materials used determines the effectiveness of the technology.

The article discusses the main methods of printing. Special attention is paid to the method of digital photo printing and equipment that allows you to print an image directly from a computer, without additional prepress processes, which significantly saves time on the production of products. The paper considers printing technology and methods for creating digital images of precious wood textures for UV-printing. In industrial conditions, samples of molded parts are prepared, wrapped on three sides. The rheological properties of UV-cured inks for gravure printing and digital photo printing are studied. The influence of temperature on the kinematic viscosity of the tested materials was evaluated. Based on the results obtained, we selected the paint with the most stable parameters that allows us to achieve the required print quality, and also recommended the optimal temperature regime of the environment in the process of creating protective and decorative coatings.

Key words: printing technology, imitation, texture, paint, viscosity.

Введение. Полиграфическая печать – один из наиболее распространенных методов имитации на предприятиях мебельной промышленности нашей страны и за рубежом. Этот метод поддается механизации и автоматизации, высокопроизводителен, обеспечивает высокое качество печати. Полученный таким образом рисунок по своим декоративным свойствам трудно отличим от рисунка естественной древесины.

Различают три основных способа печати: высокую, плоскую и глубокую. Они различаются видом печатных форм, с которых производится оттиск рисунка.

В области имитации текстуры древесины наибольшее распространение получил способ глубокой печати [1–3].

При нем поверхность печатной формы имеет выступы и впадины, но в отличие от высокой печати печатающими (дающими оттиск) являются впадины на поверхности печатной формы. Для этого первоначально вся поверхность формы заливается печатной краской. Затем

краску тщательно удаляют с поверхности выступов, оставляя ее только в углублениях. При печатании краска из углублений переносится на бумагу или другой материал.

Основными недостатками данного способа являются необходимость в изготовлении печатных валов, а также повторяемость рисунка текстуры с определенным шагом.

Для решения данной задачи предложено использовать способ цифровой печати чернилами ультрафиолетового (УФ) отверждения [4–6].

Данный способ позволяет печатать изображение прямо с компьютера, без дополнительных процессов допечатной подготовки, что значительно экономит время на изготовление печатной продукции. Качество отпечатков, получаемых способом цифровой печати, не хуже, чем в офсетной печати. Использование метода цифровой печати позволяет персонифицировать отпечатки, оперативно изменять вид структуры. Значительно уменьшаются не только затраты на стоимость допечатной подготовки, так как не требуется изготавливать печатные формы и пленки, но и риск потери качества на этих стадиях печати.

Основная часть. Предварительно с использованием современных программных средств (Adobe Photoshop [7, 8]) были воссозданы несколько типов текстур. Для того чтобы при печати придать изображению необходимый рельеф, требуется выделить выступающие элементы и создать для них специальные маски, которые хранятся в альфа-каналах. Изменяя параметры канала, можно регулировать расход краски, количество проходов и высоту рельефа.

Для создания подобного вида объемного изображения использовали гибридный широкоформатный принтер УФ-печати LinkPrint P200R6 [9] (рис. 1).

Рис. 1. Гибридный широкоформатный принтер УФ-печати LinkPrint P200R6

Применяемый принтер позволяет производить печатать на различных типах поверхностей и материалов (рулонные, плитные и имеющие сложную форму). За счет использования вакуумной системы подачи чернил обеспечен максимально качественный и стабильный процесс печати. LED-UV система отверждения чернил позволила осуществить процесс мгновенной полимеризации чернил на поверхности запечатываемого материала. Использование специальных УФ-светодиодных излучателей (LED-UV блоки), имеющих намного более долгий срок службы, обеспечивает экономию потребления электроэнергии. Также они отличаются низким уровнем выделения тепла, что значительно расширяет спектр запечатываемых материалов.

Для создания объемного изображения используют специальные чернила (L-ink UV). Особенность использования данных чернил заключается в их способе отверждения. Как правило, они представлены мономерами, которые способны мгновенно образовывать поперечные связи под действием УФ-излучения и создавать в результате фотохимической реакции полимерную пленку. УФ-технология получила свое название оттого, что в данном случае используется лучистая энергия источников света ультрафиолетового диапазона (длины волн 200–450 нм).

Стоит также отметить, что применяемые в исследованиях УФ-чернила практически не содержат вредных летучих органических соединений.

В результате проведенной работы были созданы образцы текстур, напечатанные на поверхности бумаги (рис. 2).

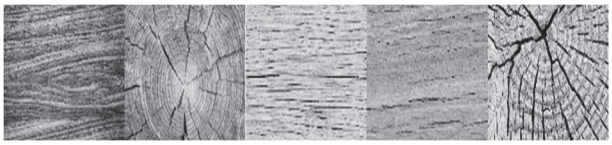


Рис. 2. Текстуры поверхностей древесины различных пород

Нанесение текстурированной бумаги на поверхность деталей производили при помощи специального оборудования – окутывающего станка Barberan серии PL [10].

Общий вид оборудования представлен на рис. 3.

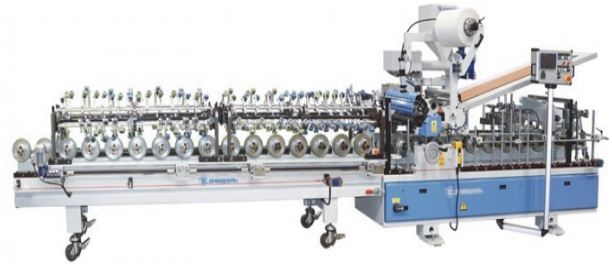


Рис. 3. Общий вид окутывающего станка Barberan PL

Станок предназначен для нанесения листовых и рулонных материалов: облицовочных бумаг, CPL и шпона – на профильные погонажные изделия, изготовленные из массива древесины,

ДСтП, MDF и прочих материалов на древесной основе, с использованием клеев-расплавов (ЭВА, полиолефин). Максимальная ширина наносимого покрытия: 280–290 мм.

Технологический процесс окутывания состоит из следующих операций [11].

Предварительно оператор подготавливает текстурированную бумагу для окутывания и устанавливает рулон в магазин станка. После этого он укладывает заготовку на станину оборудования и запускает конвейер подачи. Сперва заготовка проходит через обеспыливающие щетки. В это время на подаваемый из магазина рулонный материал происходит нанесение этилен-винил-ацетатного (EVA) клея-расплава горизонтальным клеевым валом. Далее основа и облицовочный материал подаются в зону окутывания, представляющую собой систему стальных штанг круглого сечения с обрезиненными роликами, настраиваемыми в зависимости от геометрии обертываемого профиля. Затем оба материала стыкуются между собой и, проходя через ряд обрезиненных роликов, прижимаются друг к другу под установленным давлением. В завершение операции окутывания происходит торцовка окутанного профиля дисковой пилой в необходимый размер. Готовые заготовки укладывают в паллеты и перемещают в зону технологической выдержки.

В ходе выполнения НИР на кафедре технологии и дизайна изделий из древесины в соответствии с разработанной технологией формирования декоративных покрытий на поверхности конструкционного и/или облицовочного материала методом глубокой печати лакокрасочными материалами УФ-отверждения были изготовлены образцы пленочных облицовочных материалов для технологического процесса окутывания погонажных заготовок (облицовывание с трех сторон). На поверхности этих пленок была сформирована имитационная текстура древесных материалов.

В производственных условиях на участке облицовывания погонажных изделий была изготовлена опытная партия продукции с использованием полученных облицовочных пленочных материалов.

Основой для облицовывания являлись заготовки из древесных волокнистых композиционных материалов (MDF) в соответствии с СТБ 622–2009 [12]. Облицовывание проводилось по стандартному режиму с использованием клея-расплава на линии Barberan PL.

Режим технологического процесса: давление 1 МПа, расход клея 315 г/м^2, температура плавления клея 180°С, скорость подачи материала 4–6 м/мин.

Оценивалось визуально качество склеивания – отсутствие дефектов в виде пузырей, пробития клея, изменения цвета, растрескивания сформированного декоративного покрытия.

В результате изготовления опытной партии погонажных деталей мебели все детали признаны качественными и пригодными для использования в дальнейшем технологическом процессе.

Опытные образцы погонажных деталей мебели и облицовочных материалов с отделкой на основе технологии глубокой печати показаны на рис. 4.

Рис. 4. Опытный образец погонажной детали, окутанной с трех сторон

Во многом качество печати зависит от применяемой краски (чернил). Основным показателем, отражающим реологические свойства чернил, является вязкость – это свойство, характеризующее сопротивление жидкости действию внешних сил, вызывающих ее течение [13]. Количественно вязкость оценивают коэффициентом вязкости, который отражает зависимость напряжений сдвига от скорости сдвига при различных температурах. Чернила в значительной степени меняют вязкость при изменении температуры, что существенно сказывается на качестве печати. Снижение вязкости при высоких температурах может привести к их избыточному истечению, накапливанию на поверхности печатающей головки и в результате к появлению клякс на печатном изображении. Повышение вязкости при снижении температуры приводит к тому, что чернила не успевают поступать с необходимой частотой в зону выпрыска. Как следствие – неравномерная полосчатая печать с пропаданием того или иного цвета.

В связи с этим поставлена задача измерить вязкость чернил различных производителей и выявить те, которые способны обеспечить высококачественную печать.

Для проведения испытаний были выбраны чернила следующих производителей: L-ink RE-300 UV [14], Mimaki LH-100, Arista, Apex, Lipla, INKY+ UV WOW, SIR-TOS-UV-SOL, UV-NC-LED01, InkMate.

В качестве основного параметра была выбрана кинематическая вязкость, которая определяется отношением динамической вязкости жидкости к ее плотности при той же температуре. Кинематическая вязкость является мерой сопротивления течению жидкости под влиянием силы тяжести (силы гравитации). Испытания проводились согласно ГОСТ 33768–2015 [15].

Сущность метода заключается в измерении стеклянным капиллярным вискозиметром (ВПЖ-2) времени истечения определенного объема испытуемого образца чернил под влиянием силы тяжести. Кинематическая вязкость

жидкости v равна произведению времени t истечения через капилляр определенного ее объема на постоянную вискозиметра C. Постоянная C не зависит от температуры и определяется только геометрическими размерами вискозиметра.

На отводную трубку вискозиметра надевали резиновый шланг, соединенный с грушей, и, зажав пальцем колено, переворачивали вискозиметр. Затем опускали отверстие колена в сосуд с чернилом, засасывали его в вискозиметр с помощью резиновой груши до метки $M2$, следя за тем, чтобы в расширениях не образовывалось разрывов жидкости. Затем колено вынимали из жидкости и снимали шланг с отводной трубки.

После этого на колено надевали резиновую трубку; вискозиметр погружали в жидкостной термостат так, чтобы расширение оказалось в жидкости, и укрепляли строго вертикально с помощью зажима на штативе. Другим зажимом укрепляли термометр, шарик которого находился на одном уровне с серединой капилляра. В термостате устанавливали температуру (20 ± 0,2)°С и вискозиметр выдерживали при этой температуре 10–15 мин.

Затем грушей, присоединенной к резиновой трубке, засасывали жидкость в колено примерно до 1/3 его высоты, следя за тем, чтобы не образовалось разрывов жидкости или пузырьков воздуха. Прекратив засасывание, давали жидкости стекать в расширение и наблюдали опускание уровня жидкости. Как только уровень вытекающей жидкости касался метки $M1$, включали секундомер; когда уровень жидкости касался метки $M2$, останавливали секундомер. Записав время истечения жидкости, повторяли определение не менее четырех раз. Затем вискозиметр промывали, сушили, вновь заполняли испытуемой жидкостью и вновь производили не менее четырех определений.

В ходе испытаний были получены результаты (таблица) и построены диаграммы, представленные на рис. 5.

Из полученных графиков видно, что чернила L-ink RE-300 UV обладают практически идентичной вязкостью, равной в среднем 3,1 мм^2/с, в то время как у других производителей наблюдается существенный разброс кинематической вязкости (3–24%). Это может негативно сказаться на стабильности при разбрызгивании чернил при печати, текучести их внутри картриджа и головки, их кавитации, проникновении и резкости.

Поскольку в процессе печати может происходить некоторое колебание температуры окружающей среды, то это будет также оказывать влияние на изменение кинематической вязкости чернил.

Кинематическая вязкость чернил при (20 ± 2)°С, мм^2/с

Цвет	Производитель								
	L-ink E-300 UV	Mimaki LH-100	Arista	Apex	Lipla	INKY+ UV WOW	SIR-TOS-UV-SOL	UV-NC-LED01	InkMate
Черный	3,1	2,5	3,2	2,4	2,8	3,9	3,0	3,8	2,6
Синий	3,0	2,9	3,5	2,9	3,4	2,8	2,7	2,4	2,7
Голубой	3,1	2,9	3,0	2,7	2,8	2,6	2,7	2,5	3
Пурпурный	3,1	3,4	3,3	2,7	3,5	2,6	2,8	2,5	2,9
Розовый	3,1	2,8	3,1	2,6	2,7	2,8	2,6	2,5	2,9
Желтый	3,0	2,9	3,0	2,7	2,3	3,2	2,9	2,8	2,4

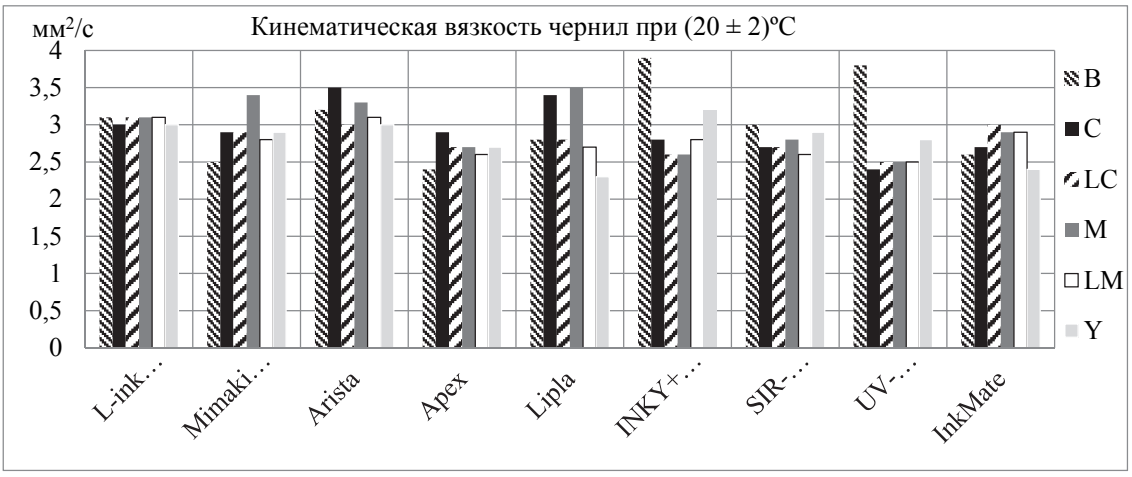


Рис. 5. Результаты измерения вязкости чернил при помощи вискозиметра ВПЖ-2

В связи с этим требовалось установить изменение вышеперечисленного параметра в зависимости от изменения температуры. Для этого температуру жидкости в термостате изменяли от 10 до 35°С с шагом 5°С. В результате эксперимента были построены графики.

Из полученных результатов следовало, что вязкость чернил L-ink RE-300 UV находится приблизительно на одном уровне при прочих равных условиях, что положительно сказывается на работе печатающей головки. Также стоит отметить, что, несмотря на разброс вязкости отдельных цветов даже одного производителя в целом, отношение между значением вязкости при 20 и 30°С у разных чернил не сильно отличаются и составляют порядка 1,32–1,35 раз, и это подтверждает, что все исследуемые чернила подчиняются одному и тому же закону, описывающему кривые изменения вязкости от температуры среды.

Также проведенное исследование позволило выявить оптимальные температурные интервалы (20–27°С), в которых качество изображения будет наилучшим.

Заключение. В результате проведенного исследования была подробно рассмотрена технология цифровой печати красками (чернилами) ультрафиолетового отверждения. В ходе выполнения работы были разработаны цифровые макеты текстур различных пород древесины и напечатаны на бумаге в производственных условиях. Также были исследованы реологические свойства красок для печати. Исходя из полученных данных можно отметить, что наиболее стабильными параметрами обладают чернила L-ink RE-300 UV, а наиболее высокое качество печати достигается при температуре окружающей среды 20–25°С.

Список литературы

1. Громыко И. Г. Технология печатных и отделочных процессов при производстве упаковки и тары: тексты лекций. Минск: БГТУ, 2019. 242 с.

2. Технология печатных процессов / А. П. Раскин [и др.]. М.: Книга, 1989. 301 с.

3. Тягунов А. Г. Специальные виды печати. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2017. 168 с.

4. Современное состояние и тенденции развития полиграфического рынка [Электронный ресурс] // КомпьюАрт. Москва, 2005. URL: https://compuart.ru/article/8390 (дата обращения: 14.03.2020).

5. Широкоформатная печать – УФ печать. УФ принтеры [Электронный ресурс] // Рекламное агентство Энергия. Москва, 2020. URL: http://www.ra-energy.ru/stati/shirokoformatnaja_pechat--uf_pechat_uf_printery (дата обращения: 14.03.2020).

6. Чернила для печати [Электронный ресурс] // Технологии производства визуальной рекламы. Москва, 2020. URL: https://www.signbusiness.ru/theory_print/chernila-dlya-pechati.php (дата обращения: 14.03.2020).

7. Топорков С. Adobe Photoshope CS в примерах. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 376 с.

8. Серадков А. Adobe Photoshope Lightroom 3. Комплексная обработка цифровых фотографий. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 301 с.

9. Гибридный широкоформатный УФ-принтер LinkPrint P200 [Электронный ресурс] // Поинт Техно. Минск, 2020. URL: https://point.by/uvprintery/gibridnyj-shirokoformatnyj-uf-printer-linkprint-p200n-model-2019g.html (дата обращения: 14.03.2020).

10. Barberan PL 32 [Электронный ресурс] // Hochsmann technology for wood. Германия, 2020. URL: https://wtp.hoechsmann.com/ru/lexikon/16769/pl_32 (дата обращения: 14.03.2020).

11. Игнатович Л. В., Шетько С. В. Технология производства мебели и столярно-строительных изделий: учеб.-метод. пособие. Минск: БГТУ, 2017. 241 с.

12. Плиты древесно-волокнистые. Технические требования. Часть 5. Требования к плитам, изготовленным по сухому методу (MDF): СТБ EN 622–5–2009. Введ. 01.01.2010. Минск: БелГИСС, 2010. 30 с.

13. Уарова Р. М., Ванников А. В., Чуркин А. В. Основы цифровой печати: учеб. пособие. М.: Моск. гос. ун-т печати, 2005. 448 с.

14. L-INK RE-300 UV [Электронный ресурс] // Поинт Техно. Минск, 2020. URL: https://point.by/katalog/chernila-promyvka-prajmer/l-ink-re-308-uv-epson-4567-uv-led.html (дата обращения: 14.03.2020).

15. Метод определения кинематической вязкости и расчет динамической вязкости прозрачных и непрозрачных жидкостей: ГОСТ 33768–2015. Введ. 01.02.2017. М.: ФГУП «ВНИИР», 2017. 20 с.

References

1. Gromyko I. G. *Tekhnologiya pechatnykh i otdelochnykh protsessov pri proizvodstve upakovki i tary: teksty lektsiy* [Technology of printing and finishing processes in the production of packaging and containers: lecture texts]. Minsk, BSTU Publ., 2019. 242 p.

2. Raskin A. N., Romeykov I. V., Biryukova N. D., Muratov Yu. A., Efremova A. N. *Tekhnologiya pechatnykh protsessov* [The technology of the printing processes]. Moscow, Kniga Publ., 1989. 301 p.

3. Tyagunov A. G. *Spetsial'nye vidy pechati* [Special types of printing]. Yekaterinburg, Ural State University Publ., 2017. 168 p.

4. *Sovremennoe sostoyanie i tendentsii razvitiya poligraficheskogo rynka* [Current state and development trends of the printing market]. Available at: https://compuart.ru/article/8390 (accessed 14.03.2020).

5. *Shirokoformatnaya pechat' – UF pechat'. UF printery* [Large format printing-UV printing. UV-printer]. Available at: http://www.ra-energy.ru/stati/shirokoformatnaja_pechat--uf_pechat_uf_printery (accessed 14.03.2020).

6. *Chernila dlya pechati* [Printing ink]. Available at: https://www.signbusiness.ru/theory_print/chernila-dlya-pechati.php (accessed 14.03.2020).

7. Toporkov S. *Adobe Photoshope CS v primerakh* [Adobe Photoshop CS in the examples]. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2005. 376 p.

8. Seradkov A. *Adobe Photoshope Lightroom 3. Kompleksnaya obrabotka tsifrovykh fotografiy* [Adobe Photoshop Lightroom 3. Complex processing of digital photos]. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2012. 301 p.

9. *Gibridnyy shirokoformatnyy UF-printer LinkPrint P200* [Hybrid wide-format UV printer LinkPrint P200]. Available at: https://point.by/uvprintery/gibridnyj-shirokoformatnyj-uf-printer-linkprint-p200n-model-2019g.html (accessed 14.03.2020).

10. Barberan PL 32. Available at: https://wtp.hoechsmann.com/ru/lexikon/16769/pl_32 (accessed 14.03.2020).

11. Ignatovich L. V., Shet'ko S. V. *Tekhnologiya proizvodstva mebeli i stolyarno-stroitel'nykh izdeliy: ucheb.-metod. posobie* [Technology of production of furniture and joinery: textbook]. Minsk, BSTU Publ., 2017. 241 p.

12. STB EN 622–5–2009. Fiberboards. Specifications. Part 5. Requirements for dry process boards (MDF). Minsk, BelGISS Publ., 2010. 30 p. (In Russian).

13. Uarova R. M., Vannikov A. V., Churkin A. V. *Osnovy tsifrovoy pechati: uchebnoe posobie* [Basics of digital printing: tutorial]. Moscow, Moscow State University of Printing Publ., 2005. 448 p.

14. L-INK RE-300 UV. Available at: https://point.by/katalog/chernila-promyvka-prajmer/l-ink-re-308-uv-epson-4567-uv-led.html (accessed 14.03.2020).

15. GOST 33768–2015. Method for determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity of transparent and opaque liquids. Moscow, FGUP VNIIR Publ., 2017. 20 p. (In Russian).

Информация об авторах

Шетько Сергей Васильевич − кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: tidid@belstu.by

Игнатович Людмила Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: ignatovich@belstu.by, ignatovich6@gmail.com

Гайдук Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: haiduk@belstu.by

Чуйков Алексей Сергеевич − кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: offlex88@mail.ru

Information about the authors

Shet'ko Sergey Vasil'yevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tidid@belstu.by

Ignatovich Lyudmila Vladimirovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ignatovich@belstu.by, ignatovich6@gmail.com

Haiduk Sergey Sergeevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: haiduk@belstu.by

Chuikov Aleksey Sergeevich – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: offlex88@mail.ru

Поступила 14.03.2020

УДК 674.11

А. А. Барташевич, Л. В. Игнатович, С. С. Утгоф
Белорусский государственный технологический университет

РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ СКЛЕИВАНИЯ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В данной работе приведены расчеты тепловых и деформационных параметров режимов склеивания слоистых композиционных древесных материалов. Представлены формулы для определения температуры в зоне клеевой прослойки слоистых клееных материалов, а также деформационные параметры процесса склеивания фанеры, связанные с зависимостями давления прессования от различных факторов. Тепловые и деформационные параметры режимов склеивания учитываются при составлении технологических режимов изготовления фанеры, фанерных плит или другой продукции, в частности новой сложной формы, которые можно определять экспериментально или расчетным методом.

Известно, что на качество клееных слоистых материалов оказывает большое влияние температурно-деформационная зависимость параметров склеивания. Теоретический метод расчета тепловых и деформационных параметров режимов склеивания слоистых композиционных древесных материалов, приведенный в статье, следует использовать в исследовательских целях, при освоении нового, нестандартного оборудования, а также для анализа причин в случае появления отклонений качества склеиваемой фанеры от нормативных требований.

Ключевые слова: тепловые и деформационные параметры, слоистые композиционные древесные материалы, фанера, клей, прочность, долговечность.

A. A. Bartashevich, L. V. Ignatovich, S. S. Utgof
Belarusian State Technological University

RESEARCH OF FEATURES OF STRUCTURAL CHANGES OF COMPACTED ALDER WOOD FOR MANUFACTURE OF JOINT-AND-CONSTRUCTION PRODUCTS AND CONSTRUCTION ELEMENTS OF FURNITURE

This paper presents calculations of the thermal and deformation parameters of the bonding modes of laminated composite wood materials. Formulas are presented for determining the temperature in the zone of the adhesive layer of laminated glued materials, as well as the deformation parameters of the plywood bonding process associated with the dependences of the pressing pressure on various factors. The thermal and deformation parameters of the bonding modes are taken into account when compiling the technological regimes for the manufacture of plywood, plywood boards or other products, in particular, a new complex shape that can be determined experimentally or by calculation.

It is known that the temperature-strain dependence of the bonding parameters has a great influence on the quality of glued laminated materials. The theoretical method for calculating the thermal and deformation parameters of the bonding regimes of laminated composite wood materials, given in the article, should be used for research purposes, in the development of new, non-standard equipment, as well as for analyzing the reasons in case of deviations in the quality of glued plywood from regulatory requirements.

Key words: thermal and deformation parameters, laminated composite wood materials, plywood, glue, strength, durability.

Введение. Древеснослоистый композиционный материал (фанера, гнутоклееные детали, слоистые пластики и др.) – многослойный материал, который может изготавливаться путем склеивания листов специально подготовленного лущеного и строганого шпона. Для повышения прочности данного материала слои шпона накладываются так, чтобы волокна древесины каждого листа были перпендикулярны соседним, поэтому, что бы направления внешних слоев совпадали, количество слоев шпона обычно нечетное: три и более [1–4].

В основном листы фанеры имеют нечетное количество слоев шпона: в этом случае шпон расположен симметрично относительно среднего слоя. Если слоев шпона в фанере четыре, то центральные слои располагают и склеивают перпендикулярно наружным, что увеличивает общую прочность и стойкость к деформации [1–4].

Современные древеснослоистые композиционные материалы – это композиции, изделия из которых имеют определенное сочетание эксплуатационных свойств. Например, фанера – это система разнородных материалов, каждый имеет

свое конкретное назначение в готовом изделии. Ни шпон, ни клей не могут выполнять свою функцию независимо, а в фанере они используются совместно и должны рассматриваться как единая композиция. Следовательно, клееный композиционный материал – это материал, свойства которого и количественно, и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих [3, 4].

Процесс изготовления слоистых материалов из древесины (фанеры, гнутоклееных деталей, слоистых пластиков и др.) включает несколько операций, важнейшей из которых является операция склеивания пакетов в горячем прессе.

На качество клеевого соединения (прочность, водостойкость, долговечность) оказывают влияние многие факторы – вид клея, его состав, вязкость, удельный расход, температура плит пресса, продолжительность и давление прессования [5–7].

Для получения клееных композиций из древесины широко применяется карбамидоформальдегидный клей. В настоящее время карбамидоформальдегидные смолы являются наиболее востребованными в производстве слоистых композиционных древесных материалов и изделий из древесины, они обеспечивают высокую прочность и качество склеивания, а также время их отверждения можно регулировать в значительных пределах.

Клеевые композиции на основе карбамидоформальдегидных смол отверждаются в процессе горячего склеивания только под воздействием отвердителя, который создает в клее кислую среду, способствующую протеканию последнего этапа поликонденсации. С повышением температуры процесс структурообразования происходит более полно, что должно вести к увеличению прочностных показателей клеевого соединения.

Основная часть. *Расчет параметров тепловых режимов процесса склеивания фанеры*. Существенное влияние на характер образования адгезионно-когезионных связей оказывают режимы склеивания, особенно температура. Нагрев ускоряет процесс отверждения клея и приводит к образованию полимеров с другими свойствами в сравнении с отверждением в нормальных условиях [8].

При соответствующем режиме нагрева прочность и водостойкость клеевой прослойки повышается за счет более полного структурирования полимера. В начальный период нагрева уменьшается вязкость клея, что обеспечивает лучшую его растекаемость и смачиваемость поверхности. Это ведет к увеличению количества активных центров поверхности материала, активных групп клея и их временному геометрическому совпадению. Площадь контакта клея с материалом увеличивается из-за лучшего заполнения клеем неровностей на поверхности склеиваемого материала.

Для горячего склеивания фанеры важен выбор нагревательного оборудования и режимов нагрева, обеспечивающих высокую производительность и прочность склеивания. Выбор типа нагревательного оборудования и параметров режимов склеивания может быть обоснован расчетным методом.

При склеивании с кондуктивным нагревом тепло передается клеевой прослойке через слои древесного материала от внешнего теплоносителя. Определяющим фактором при установлении режимов склеивания являются размеры и теплотехнические характеристики древесно-слоистого материала, например из лущеного шпона [9, 10].

Тепло передается кондуктивно благодаря теплопроводности материала. Необходимое общее время нагрева складывается из времени нагрева материала до наиболее удаленного клеевого слоя и времени, необходимого для отверждения клея. Отверждение клея начинается уже в период прогрева материала, т. е. еще до достижения требуемой температуры.

Теплотехнические свойства натуральной древесины и процесс теплопереноса от времени проведения опытов не зависят.

Расчетный метод определения режимов склеивания основан на экспериментальном определении достигаемой полноты отверждения клея и прочности соединений при различной температуре клеевой прослойки [11, 12].

Расчет параметров тепловых режимов процесса склеивания фанеры рассматривается, когда наружные листы шпона склеиваются с внутренним (трехслойная фанера из шпона толщиной 1,5 мм).

Система состоит из трех неограниченных пластин в граничных условиях четвертого рода. Для упрощения расчетных формул принят ряд допущений:

– термические свойства склеиваемых материалов являются постоянными и соответствуют средней температуре нагрева шпона;

– тепло от нагревателя (плит пресса) передается кондуктивно только за счет теплопроводности;

– начальная температура панели одинакова по всему объему, а температура нагревателя одинакова по всей площади контакта;

– поверхность шпона в начальный период нагрева принимает температуру нагревателя.

Рассматриваем случай, когда температура нагревателя постоянная. Температура в зоне клеевой прослойки может быть выражена формулой (1):

$$t = t_{\text{о}} + \frac{2K}{1+K}(t_{\text{пр}} - t_{\text{о}})\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{1-K}{1+K}\right)^{n-1} erfc\frac{2n-1}{2\sqrt{Fo_1}}, \quad (1)$$

где t – текущая температура рассматриваемой плоскости, °С; $t_{\text{о}}$ – температура окружающей среды, °С; $t_{\text{пр}}$ – температура на поверхности нагревателей, °С; K – критерий, характеризующий тепловую активность первого верхнего слоя листа шпона слоистого материала по отношению ко второму среднему слою:

$$K = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\sqrt{\frac{a_2}{a_1}}, \quad (2)$$

где λ_1 и λ_2 – коэффициенты теплопроводности соответственно для среднего слоя древеснослоистого материала, Вт/м·град; a_1 и a_2 – коэффициенты температуропроводности для среднего слоя, м^2/с; *erfc* – обозначение функции ошибок Гаусса с аргументом

$$\frac{2n-1}{2\sqrt{Fo_1}}, \quad (3)$$

Fo_1 – обозначение критерия Фурье для слоистого композиционного древесного материала толщиной R:

$$Fo_1 = \frac{a_1\tau}{R^2}, \quad (4)$$

где τ – время, с; R – расстояние от поверхности шпона до клеевой прослойки.

Для слоистого композиционного древесного материала – фанеры – критерий K близок к 1. Тогда формула значительно упрощается. Рассматриваемую систему тел можно заменить одним полуограниченным телом, соприкасающимся с нагревателем, температура которого постоянна. Формула для определения температуры в клеевой прослойке запишется так:

$$t = t_{\text{о}} + (t_{\text{пр}} - t_{\text{о}})erfc\frac{1}{2\sqrt{Fo_1}}. \quad (5)$$

Анализ расчетных и экспериментальных значений температур показал удовлетворительное согласование их между собой в течение всего цикла нагрева [8, 10].

Деформационные параметры склеивания слоистых материалов. Деформационные параметры процесса склеивания фанеры связаны с зависимостью давления прессования от различных факторов. Они должны учитываться при составлении технологических режимов изготовления фанеры, фанерных плит или другой древеснослоистой продукции. Их можно определять экспериментально или расчетным методом.

В процессе прессования необходимо обеспечить плотное прилегание поверхностей листов склеиваемого пакета и получение клеевой прослойки требуемой толщины.

При ровных поверхностях склеиваемых листов шпона и с наименьшим допустимым ГОСТ параметром шероховатости достигнуть двухстороннего контакта жидкой клеевой прослойки со склеиваемыми листами лущеного шпона нетрудно, даже при сравнительно низком давлении, например 0,5 МПа. Если склеиваемые поверхности имеют большие неровности и шероховатость, давление потребуется большой величины, и оно будет зависеть от размеров и жесткости, а также от величины неровностей поверхности склеиваемых материалов.

Шероховатость поверхности лущеного шпона, из которого изготовляется фанера, допускается до $Rm_{\max}$ = 320 мкм. При формировании пакета листы шпона укладываются взаимно перпендикулярно. При этом в местах контакта выступающих элементов волокон на поверхности образуются выступы, а по соседству с ними – впадины.

В процессе склеивания давление по площади пакетов распределяется неравномерно из-за неровностей. При прессовании давление на первом этапе будет восприниматься выступами неровностей [13, 14].

Постепенно, при увеличении давления, выступы будут сминаться, и деформацию выступов при смятии достаточно произвести в пределах закона Гука, при этом деформация связана с напряжением зависимостью

$$\xi = \frac{\sigma}{E}, \quad (6)$$

где ξ – деформация (относительное уменьшение высоты); σ – напряжение (предел прочности при смятии поперек волокон); E – модуль упругости при смятии поперек волокон.

Максимальная величина неровностей теоретически может достигнуть величины $2Rm_{\max}$ (двойной величины неровностей).

Полностью устранить неровности прессованием невозможно, они только уменьшаются за счет ликвидации пористости и некоторой поперечной деформации. Пустоты неустраненных неровностей заполняет клей, который до начала желатинизации имеет высокую текучесть.

Для устранения неровностей потребуется усилие пресса, величина которого может быть определена формулой

$$P = F\sigma_{\text{см}}, \quad (7)$$

где F – площадь склеивания; $\sigma_{\text{см}}$ – предел прочности при смятии поперек волокон древесины.

Предел прочности при смятии вдоль волокон при температуре 20°С равен: для березы – 58 МПа, для ольхи – 45 МПа. При смятии поперек волокон показатель прочности в 20 раз меньше, чем при смятии вдоль волокон.

При температуре 100°С предел прочности необходимо корректировать по формуле

$$t = t_o - K(t - 20), \quad (8)$$

где K – поправочный коэффициент на температуру [7].

С учетом поправочного коэффициента предел прочности при смятии поперек волокон равен: для березы – 2,3 МПа, для ольхи – 1,4 МПа.

Усилие пресса для устранения неровностей поверхностей шпона при склеивании фанеры размером 1600×1600 мм (до обрезки) составит:

– для березового шпона

$$P_{Rm} = F\sigma_{см} = 1600 \cdot 1600 \cdot 2{,}3 = 5\,888\,000,$$
$$H = 588{,}8 \text{ т};$$

– для ольхового шпона

$$P_{Rm} = F\sigma_{см} = 1600 \cdot 1600 \cdot 1{,}4 = 3\,584\,000,$$
$$H = 358{,}4 \text{ т}.$$

Для создания контакта склеиваемых поверхностей понадобится дополнительное усилие пресса. Его следует принимать минимальным ($P_{мин}$), соответствующим давлению величиной до 0,1 МПа. При этом усилие пресса понадобится величиной

$$P_{мин} = 0{,}1F = 1600 \cdot 1600 \cdot 0{,}1 = 256\,000,$$
$$H = 25{,}6 \text{ т}.$$

На величину давления кроме размеров и свойств древесины (плотности, шероховатости поверхности шпона) оказывает значительное влияние вязкость клея. При большой вязкости для получения клеевой прослойки требуемой толщины необходимо значительное давление. Зависимость между вязкостью и давлением при склеивании с интенсивным нагревом может выражаться следующим уравнением [7]:

$$P = \frac{\mu_к b^2 \cdot 10^3}{2 \cdot 981 \cdot t y_п^2} \approx \frac{\mu_к \cdot b^2}{2 t y_п^2}, \quad (9)$$

где P – удельное давление, кгс (1 кгс = 0,1 МПа); $\mu_к$ – вязкость клея в период максимальногоразжижения, сП; b^2 – ширина склеиваемых пластин, см; $y_п^2$ – требуемая толщина клеевой прослойки, мкм; t – время вязко-текучего состояния, с.

Усилие пресса для формирования клеевой прослойки составит

$$P_{кл} = PF, \quad (10)$$

где $P_{кл}$ примерно составляет $0{,}2P_{Rm}$ (т. е. 0,2 усилия прессования для устранения неровностей поверхности шпона).

Общее усилие пресса при склеивании фанеры из березового шпона составит

$$P_{общ} = P_{Rm} + P_{мин} + P_{кл} = 588{,}8 + 25{,}6 + (0{,}2 \cdot 588{,}8) = 732{,}16 \text{ т}.$$

Такое усилие прессования создает давление при склеивании 2,86 Мпа.

Общее усилие пресса при склеивании фанеры из ольхового шпона составит

$$P_{общ} = P_{Rm} + P_{мин} + P_{кл} = 358{,}4 + 25{,}6 + (0{,}2 \cdot 358{,}4) = 455{,}68 \text{ т}.$$

Такое усилие прессования создает давление при склеивании 1,78 МПа.

Заключение. На основании данных исследований можно заключить следующее.

1. Анализ расчетных и экспериментальных значений температур показал удовлетворительное согласование данных параметров между собой. Для практики достаточен экспериментальный метод как более легкий для расчета тепловых параметров режимов склеивания слоистых композиционных древесных материалов.

2. Определение влияния величины давления на деформационные параметры режимов склеивания слоистых древесных материалов в зависимости от состояния склеиваемых пластин, величины неровностей, особенностей строения древесины, из которой изготовлен шпон (составляющей P_{Rm}), весьма затруднительно, так как эти факторы не постоянны.

Список литературы

1. Фанера общего назначения с наружными слоями из шпона лиственных пород: ГОСТ 3916.1–96. Введ. 01.01.98. М.: Изд-во стандартов, 1999. 26 с.

2. Фанера общего назначения с наружными слоями из шпона хвойных пород: ГОСТ 3916.2–96. Введ. 01.01.98. М.: Изд-во стандартов, 1999. 27 с.

3. Ярцев В. П., Киселева О. А., Сузюмов А. В. Прогнозирование прочности и долговечности строительной фанеры [Электронный ресурс] // ООО «Рикконэ»: сайт. URL: http://www.best-fanera.ru/info/prognoz-prochnosti-fanery.html (дата обращения: 22.01.2020).

4. Древесные композиционные материалы [Электронный ресурс] // Знайтовар.Ру – торговля, бизнес, товароведение, экспертиза: сайт. URL: https://znaytovar.ru/new2778.html (дата обращения: 22.01.2020).

5. Хрулев В. М. Долговечность клееной древесины. М.: Лесная пром-сть, 1971. 160 с.

6. Иванов Ю. М., Лепарский Л. О., Сенчило Ю. Я. Прочность и напряжения клеевых соединений древесины. М.: Лесная пром-сть, 1973. 160 с.

7. Боровиков А. М., Уголев Б. Н. Справочник по древесине. М.: Лесная пром-сть, 1989. 294 с.

8. Рындин В. О. Исследование старения древесных композитов под воздействием различных эксплуатационных факторов // Сборник авторефератов магистров ТГТУ. 2006. № 7. С. 21–34.

9. Веретиков И. И. Влияние температурно-влажностных воздействий на прочностные показатели клеевых соединений // Труды БГТУ. 2015. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 170–173.

10. Кириллов А. Н. Конструкционная фанера. М.: Лесная пром-сть, 1981. 112 с.

11. Древесина слоистая клееная. Метод определения предела прочности при скалывании: ГОСТ 9624–93. Введ. 01.01.95. М.: Изд-во стандартов, 1994. 10 с.

12. Ефимов В. А., Петрова А. П., Аниховская Л. И. Ускоренные испытания клеевых соединений // Клеи. Герметики. Технологии. 2005. № 7. С. 1–12.

13. Кашубский Н. В., Сельский А. А., Смолин А. Ю. Неразрушающие методы контроля материалов и изделий. Красноярск: ИПК СФУ, 2009. 108 с.

14. Савицкий С. С. Методы и средства неразрушающего контроля. Минск: БНТУ, 2012. 183 с.

References

1. GOST 3916.1-96.1. General purpose plywood with outer layers of hardwood veneer. Moscow, Standartinform Publ., 1999. 26 p. (In Russian)

2. GOST 3916.2-96.1. General purpose plywood with external layers of softwood veneer. Moscow, Standartinform Publ., 1999. 27 p. (In Russian)

3. Yartsev V. P., Kiselyova O. A., Suzyumov A. V. *Prognozirovaniye prochnosti i dolgovechnosti stroitel'noy fanery* [Predicting the strength and durability of construction plywood]. Available at: http://www.best-fanera.ru/info/prognoz-prochnosti-fanery.htm (accessed 22.01.2020).

4. *Drevesnyye kompozitsionnye materialy* [Wood composite materials]. Available at: https://znaytovar.ru/new2778.html (accessed 22.01.2020).

5. Khrulev V. M. *Dolgovechnost' kleenoy drevesiny* [The durability of laminated wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1971. 160 p.

6. Ivanov Yu. M., Leparskiy L. O., Senchilo Yu. Ya. *Prochnost' i napryazheniya kleevykh soyedineniy drevesiny* [Strength and stresses of glued wood joints]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 160 p.

7. Borovikov, A. M., Ugolev B. N. *Spravochnik po drevesine* [Wood reference]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 294 p.

8. Ryndin V. O. Study of the aging of wood composites under the influence of various operational factors. *Sbornik avtoreferatov magistrov* TGTU [Collection of Master's Abstracts of TGTU], 2006, no. 7, pp. 21−34 (In Russian).

9. Veretikov I. I., Effects of temperature and moisture actions on strength factors of adhesive joints. Trudy BGTU [Proceedings of BSTU], 2015, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 170–173 (In Russian).

10. Kirillov A. N. *Konstruktsionnaya fanera* [Construction plywood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1981. 112 p.

11. GOST 9624-93. Wood laminated glued. Method for determining the breaking strength. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1994. 10 p. (In Russian).

12. Yefimov V. A., Petrova A. P., Anikhovskaya L. I. Accelerated tests of adhesive joints. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Glues. Sealants. Technologies], 2005, no. 7, pp. 1–12 (In Russian).

13. Kashubskiy N. V., Sel'skiy A. A., Smolin A. Yu. Nerazrushayushchiye metody kontrolya materialov i izdeliy [Non-destructive methods of control of materials and products]. Krasnoyarsk, IPK SFU Publ., 2009, 108 p.

14. Savitskiy S. S. *Metody i sredstva nerazrusayushchego kontrolya* [Methods and means of non-destructive testing]. Minsk, BNTU Publ., 2012. 183 p.

Информация об авторах

Барташевич Александр Александрович – кандидат технических наук, почетный доктор, профессор, профессор кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: BAArch_AABS@mail.ru.

Игнатович Людмила Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: ignatovich@belstu.by, lignatovich6@gmail.com.

Утгоф Светлана Сергеевна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: utgof@belstu.by

Information about the authors

Bartashevich Aleksander Aleksandrovich – PhD (Engineering), Honoris Causa, Professor, Professor of the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str, 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: BAArch_AABS@mail.ru

Ignatovich Ludmila Vladimirovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ignatovich@belstu.by, lignatovich6@gmail.com

Utgof Svetlana Sergeevna – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: utgof@belstu.by

Поступила 09.03.2020

УДК 674.048

А. А. Барташевич, Л. Г. Билош, С. С. Утгоф
Белорусский государственный технологический университет

О СВЯЗИ ОБЪЕМНОГО РАЗБУХАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ С ПРОЧНОСТЬЮ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В статье приводятся данные по объемному разбуханию древесины в зависимости от влажности. За базовое значение влажности, относительно которой ведется отсчет изменений свойств, приняты величины 12 и 32%. При значениях влажности, отличных от 12 и 32%, разбухание древесины определяется с помощью поправочных коэффициентов. Установлено, что древесина березы при уменьшении влажности от 12 до 8% теряет коэффициент набухания несколько больше, чем древесина дуба. Величина этой разности мизерная, но она компенсируется за счет деформации клеевой прослойки, но при этом ее прочность уменьшается.

В ходе исследования была установлена связь объемного разбухания с характером изменения прочности клеевых соединений разных пород древесины. Такие случаи встречаются при изготовлении многослойного паркета, фанерных плит, при облицовывании пластей. Для минимизации воздействия перепадов влажности на клеевые соединения различных пород древесины рекомендуется увеличить продолжительность технологической выдержки деталей больших размеров после горячего прессования.

Ключевые слова: древесина, влажность, набухание, поправочные коэффициенты, напряжения скалывания, береза, дуб.

A. A. Bartashevich, L. G. Bilash, S. S. Utgof
Belarusian State Technological University

ON THE RELATIONSHIP OF VOLUMETRIC WOOD SWELLING WITH THE STRENGTH OF ADHESIVE JOINTS

The article provides data on the volume swelling of wood depending on humidity. The base value of humidity, relative to which changes in properties are counted, is assumed to be 12 and 32%. At humidity values other than 12 and 32%, wood swelling is determined using correction coefficients. It was found that birch wood loses the swelling coefficient slightly more than oak wood when the humidity decreases from 12 to 8%. The value of this difference is minuscule, but it is compensated by the deformation of the adhesive layer, while reducing its strength.

In the course of the study the relationship of volume swelling with the nature of changes in the strength of adhesive joints of different wood species was established. Such cases occur in the manufacture of multi-layer parquet, plywood boards, when facing layers. To minimize the impact of humidity changes on the adhesive joints of various types of wood, it is recommended to increase the duration of technological aging of large parts after hot pressing.

Keywords: wood, humidity, swelling, correction coefficients, shear stress, birch, oak.

Введение. Целью исследований является установление связи объемного разбухания с характером изменения прочности клеевых соединений. В производственной практике имеют место случаи склеивания между собой многих элементов различных пород: дуба и березы, березы и ольхи, ольхи и сосны и др. Такие случаи встречаются при изготовлении многослойного паркета, фанерных плит, при облицовывании и др. Представляет при этом интерес, как реагируют на такие случаи клеевые соединения.

Основная часть. С влажностью древесины и ее изменениями связаны внутренние напряжения.

Внутренние напряжения в древесине – это напряжение, которое возникает без приложения внешних усилий вследствие неоднородности деформации древесины во время роста дерева, при сушке, увлажнении. Причиной их появления является неравномерное удаление связанной влаги из древесины. Возникающий перепад влажности вызывает появление внутренних напряжений. При сушке в поверхностной зоне сортимента возникает сначала растягивающее, а затем сжимающее напряжение. Внутри материала создаются напряжения противоположного знака. Полные внутренние напряжения представляют собой сумму влажностных и остаточных напряжений.

Свойства древесины принято давать при влажности 12 и 30%. При других значениях влажности свойства древесины корректируются с помощью поправочных коэффициентов. В таблице приведены поправочные коэффициенты для определения объемного разбухания древесины в пределах влажности от 5 до 30%.

Поправочные коэффициенты для определения объемного разбухания

Влажность, %	Коэффициент объемного разбухания при плотности	
	0,6 г/см^3	0,5 г/см^3
5	0,976	0,969
6	0,979	0,974
7	0,983	0,978
8	0,986	0, 982
9	0,990	0,987
10	0,993	0,991
11	0,996	0,996
12	1,00	1,00
13	1,003	1,004
14	1,006	1,008
15	1,01	1,012
16	1,013	1,016
17	1,016	1,020
18	1,019	1,024
19	1,022	1,028
20	1,025	1,031
21	1,028	1,036
22	1,031	1,040
23	1,034	1,044
24	1,037	1,047
25	1,040	1,051
26	1,043	1,055
27	1,046	1,058
28	1,052	1,062
29	1,052	1,062
30	1,054	1,069

Остаточные напряжения в высушенном материале приводят к его короблению при механической обработке. Рассмотрим случай склеивания образцов из древесины березы и дуба и изучим, как они поведут себя при изменении влажности. Размеры образцов в сечении – 100×25 мм. Они склеиваются между собой пластями, образуя блок размером в сечении 100×50 мм.

Допустим, что при длительном хранении в постоянных условиях склеенный блок будет иметь влажность 12%. Напряжения в клеевом слое отсутствуют. Затем условия хранения образцов меняются, и влажность уменьшается от 12 до 8%. Как поведут себя при этом пластины из березы и дуба?

Образец из березы при влажности 12% имел коэффициент объемного разбухания $К_{12} = 0,62\%$ на 1% влажности. При уменьшении влажности блока до 8% коэффициент объемного набухания с учетом поправочного коэффициента на влажность стал равным $К_8 = 0,62 \cdot 0,986 = 0,6113$, где 0,986 – поправочный коэффициент. Разность между коэффициентами объемного разбухания при 12 и 8% равна: 0,62 – 0,6113 = 0,0087.

Образец из дуба при влажности 12% имел коэффициент объемного разбухания $К_{12} = 0,52$. При уменьшении влажности до 8% он стал равным $К_8 = 0,52 \cdot 0,986 = 0,513$. Разность между коэффициентами объемного разбухания дуба при 12 и 8% составила 0,52–0,513 = 0,007.

Разность между величинами изменений коэффициентов разбухания березы и дуба стала равной 0,0087 – 0,007 = 0,0017%. При ширине образца в поперечном сечении размером 100 мм величина 0,0017% равна 0,0017 мм.

Так как коэффициент объемного разбухания березы больше, чем дуба, это означает, что образец из березы при изменении влажности от 12 до 8% стремится уменьшиться в размере больше, чем образец из дуба (на величину 0,0017%). Это незначительное изменение размера, но компенсация его (выравнивание величин деформаций) происходит не за счет древесины, а за счет деформации клеевого слоя.

На рисунке представлена паркетная доска, лицевой слой которой изготовлен из древесины дуба, а основание – из влагостойкой березовой фанеры.

Паркетная доска

Карбамидоформальдегидные клеи очень жесткие, и малейшая их деформация фактически недопустима. Это может быть одной из причин разрушения клеевых соединений.

Поливинилацетатные клеи более пластичные по сравнению с карбамидоформальдегидными, что является их положительным свойством. Для уменьшения внутренних напряжений и выравнивания их, а также снижения влажности по сечению сортиментов дается технологическая выдержка после склеивания. По технологическим режимам горячего склеивания она рекомендуется 2 ч, или не менее 2 ч. Надо отметить, что за 2 ч щитовые детали в стопе далеко не полностью уменьшат температуру до необходимого уровня. При возможности технологическую выдержку желательно увеличить, особенно при деталях большого размера.

Заключение. 1. На основании приведенных результатов изменений коэффициента набухания

в зависимости от влажности следует рекомендовать избегать случаев склеивания между собой элементов из древесины разных пород, которые отличаются величинами коэффициентов объемного разбухания. Это касается в первую очередь случаев, когда клеевые соединения воспринимают большие нагрузки в ответственных конструкциях.

2. Широко применяемые карбамидоформальдегидные клеи в твердом состоянии весьма жесткие и при колебаниях влажности могут ослаблять прочностные свойства клеевых соединений, вплоть до разрушения. Поэтому очень важно соблюдать технологические режимы склеивания и последующей технологической выдержки.

Список литературы

1. Хрулев В. М. Долговечность клееной древесины. М.: Лесная пром-сть, 1971. 160 с.

2. Иванов Ю. М., Лепарский Л. О., Сенчило Ю. Я. Прочность и напряжения клеевых соединений древесины. М.: Лесная пром-сть, 1973. 160 с.

3. Веретиков И. И. Влияние температурно-влажностных воздействий на прочностные показатели клеевых соединений // Труды БГТУ. 2015. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 170–173.

4. Древесина слоистая. Метод определения предела прочности при скалывании: ГОСТ 96–2493. Введ. 01.01.95. М.: Изд-во стандартов, 1994. 10 с.

5. Древесина слоистая клееная. Отбор образцов и общие требования при испытании: ГОСТ 9620–94. Введ. 01.01.96. М.: Изд-во стандартов, 1995. 8 с.

6. Справочник мебельщика / под ред. В. П. Бухтиярова. М.: МГУЛ, 2005. 600 с.

7. Боровиков А. М., Уголев Б. Н. Справочник по древесине. М.: Лесная пром-сть, 1989. 294 с.

8. Барташевич А. А., Трофимов С. П. Конструирование мебели. Учебник. Минск: Совр. шк., 2006. 335 с.

9. Барташевич А. А., Игнатович Л. В., Шетько С. В. Технология изделий из древесины. Минск: БГТУ, 2015. 437 с.

10. Игнатович Л. В., Шетько С. В. Технология производства мебели и столярно-строительных изделий. Минск: БГТУ, 2017. 241 с.

11. Барташевич А. А., Игнатович Л. В. Материалы деревообрабатывающих производств. М.: Инфра-М, 2020. 306 с.

12. Уголев Б. Н. Контроль напряжений при сушке древесины. М.: Лесная пром-сть, 1980. 208 с.

13. Серговский П. С., Расев А. И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины: учебник. М.: Лесная пром-сть, 1987. 360 с.

14. Пижурин А. А. Основы научных исследований в деревообработке. М.: МГУЛ, 2005. 305 с.

15. Ковальчук Л. М. Технология склеивания. М.: Лесная пром-сть, 2003. 208 с.

16. Гончаров Н. А., Башинский В. Ю., Буглай Б. М. Технология изделий из древесины: учебник. М.: Лесная пром-сть, 1990. 528 с.

References

1. Khrulev V. M. Dolgovechnost’ kleyenoy drevesiny [The durability of laminated wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost’ Publ., 1971. 160 p.

2. Ivanov Yu. M., Leparskiy L. O., Senchilo Yu.Ya. Prochnost’ i napryazheniya kleevykh soyedineniy drevesiny [Strength and stresses of glued wood joints]. Moscow, Lesnaya promyshlennost’ Publ., 1973. 160 p.

3. Veretikov I. I. Effects of temperature and moisture actions on strength factors of adhesive joints. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 170–173 (In Russian).

4. GOST 9624-93. Laminated wood. Method for the determination of ultimate strength in shearing. Moscow, Standartinform Publ., 1995. 10 p. (In Russian).

5. GOST 9620-94. Laminated wood. Sampling and general requirements for the test. Moscow, Standartinform Publ., 1995. 8 p. (In Russian).

6. Bukhtiyarov V. P. *Spravochnik mebel’shchika* [Furniture maker’s guide]. Moscow, 2005. 600 p.

7. Borovikov A. M., Ugolev B. N. *Spravochnik po drevesine* [Wood reference]. Moscow, Lesnaya promyshlennost’ Publ., 1989. 294 p.

8. Bartashevich A. A., Trofimov S. P. *Konstruirovanie mebeli* [The design of the furniture]. Minsk, Sovremennaya shkola Publ. 2006. 335 p.

9. Bartashevich A. A., Ignatovich L. V., Shet’ko S. V. *Tekhnologiya izdeliy iz drevesiny* [Technology of wood products]. Minsk, BSTU Publ., 2015. 437 p.

10. Ignatovich L. V., Shet’ko S. V. *Tekhnologiya proizvodstva mebeli i stolyarno-stroitel’nykh izdeliy* [Technology of furniture and joinery production]. Minsk, BSTU Publ., 2017. 241 p.

11. Bartashevich A. A., Ignatovich L. V. *Materialy derevoobrabatyvayushchikh proizvodstv* [Materials of woodworking industries]. Moscow, Infra-M Publ., 2020. 306 p.

12. Ugolev B. N. Kontrol' napryazheniy pri sushke drevesiny [Stress monitoring during wood drying]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 208 p.

13. Sergovskiy P. S., Rasev A. I. *Gidrotermicheskaya obrabotka i konservirovanie drevesiny* [Hydrothermal processing and preservation of wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1987. 360 p.

14. Pizhurin A. A. *Osnovy nauchnykh issledovaniy v derevoobrabotke* [Fundamentals of scientific research in woodworking]. Moscow, MGUL Publ., 2005. 305 p.

15. Koval'chuk L. M. *Tekhnologiya skleivaniya* [Bonding technology]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 2003. 208 p.

16. Goncharov N. A., Bashinskiy V. Yu., Buglay B. M. *Tekhnologiya izdeliy iz drevesiny* [Technology of wood products]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 528 p.

Информация об авторах

Барташевич Александр Александрович – кандидат технических наук, почетный доктор, профессор, профессор кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: BAArch_AABS@mail.ru

Билаш Людмила Григорьевна – магистрант, преподаватель Технологического отделения. Гомельский политехнический колледж (246050, г. Гомель, ул. Билецкого, 6, Республика Беларусь).

Утгоф Светлана Сергеевна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: utgof@belstu.by

Information about the authors

Bartashevich Aleksander Aleksandrovich – PhD (Engineering), Honoris Causa, Professor, Professor of the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: BAArch_AABS@mail.ru.

Bilash Lyudmila Grigoryevna – Master's degree student, lecturer of Technology Department. Gomel Polytechnic College (6, Biletskogo str., 246050, Gomel, Republic of Belarus).

Utgof Svetlana Sergeevna – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: utgof@belstu.by

Поступила 09.03.2020

УДК 674.04.047.3

О. Г. Рудак
Белорусский государственный технологический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ТЕРМОВЛАГОПРОВОДНОСТИ ПРИ ПРОГРЕВЕ ДРЕВЕСИНЫ В НЕНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЕ

В статье приведены результаты исследования термовлагопроводности древесины комплексным методом. Получены зависимости, отражающие характер изменения температуры на поверхности и внутри древесины во времени. Определены закономерности изменения коэффициента термовлагопроводности от условий обрабатывающей среды во времени.

В период прогрева древесины наблюдается заметный перепад температур на поверхности и внутри образца, что является причиной формирования неравномерного температурного поля по сечению древесины.

В свою очередь, возникновение разницы температур является причиной перемещения влаги по направлению потока теплоты. Задача операции прогрева заключается в подготовке влагопроводящей системы древесины к равномерному испарению влаги.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что на величину коэффициента термовлагопроводности влияние оказывают следующие переменные факторы: температура прогрева, степень насыщенности обрабатывающей среды, начальная влажность образца.

В результате исследования определен характер изменения величины термоградиентного коэффициента для образцов различной толщины и начальной влажности в зависимости от температуры и степени насыщенности обрабатывающей среды во времени.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при разработке режимов начального прогрева, повышающих качество продукции и снижающих энергозатраты на проведение данного процесса.

Ключевые слов: начальный прогрев, режим прогрева, перепад температур, термовлагопроводность, коэффициент, влагопроводность, степень насыщенности.

O. G. Rudak
Belarusian State Technological University

RESEARCH OF THE PHENOMENON OF THERMAL CONDUCTIVITY DURING WOOD HEATING IN UNSATURATED MEDIUM

The article presents the results of the research of thermal conductivity of wood by a complex method. Relationships reflecting the nature of temperature change over time and within wood were obtained. Regularities of thermal conductivity coefficient change from conditions of processing medium in time are determined.

During the period of wood warming, there is a marked temperature difference on the surface and inside the sample, which causes the formation of an uneven temperature field along the cross-section of the wood.

In turn, the occurrence of temperature differences causes moisture to move in the direction of heat flow. The purpose of the warm-up operation is to prepare the moisture conducting system of the wood for uniform evaporation of moisture.

The obtained experimental data show that the value of the thermal conductivity coefficient is influenced by the following variable factors: the temperature of the heat, the degree of saturation of the processing medium, the initial humidity of the sample. As a result of the study, the nature of the change in the value of the thermogenic coefficient for samples of different thickness and initial humidity depending on the temperature and degree of saturation of the processing medium over time was determined.

The results of the research can be used in the development of initial warm-up modes, which improve the quality of the product and reduce the energy consumption for this process.

Key words: initial warming up, warming up mode, temperature difference, thermomoisture pro-water content, coefficient, moisture pro-water content, saturation degree.

Введение. Главная цель сушки – это превращение древесины из природного сырья в промышленный материал с коренным улучшением ее свойств [1]. Таким образом, сушка является обязательным процессом в производстве не только изделий мебели, но и столярно-строительных деталей, оконных и дверных блоков, фанеры и др.

Сушка древесины – это сложный процесс, поскольку:

1) древесина различных пород имеет разные физико-механические свойства;

2) анизотропия строения древесины предполагает различные значения основных механических и физических свойств;

3) используются различные по размерам древесные сортименты;

4) различны качественные требования к сушильному процессу;

5) имеет место сложность физических процессов, возникающих при сушке;

6) большая длительность процесса [2].

Известно, что первой технологической операцией, предшествующей сушке, является начальный прогрев.

Основная цель операции начального прогрева – это подготовка влагопроводящей системы древесины к операции сушки. Для этого необходимо создать условия (определить оптимальные параметры сушильного агента) для равномерного испарения влаги по толщине пиломатериала.

В процессе прогрева протекают три совместно действующих явления тепломассопереноса:

– перемещение тепла по материалу – теплопроводность;

– перемещение влаги по материалу – влагопроводность;

– термовлагопроводность.

Результаты исследований первых двух явлений были представлены в работах [3], [4].

Под термином «термовлагопроводность» принято понимать свойство древесины перемещать влагу под действием перепада (градиента) температур.

Изучением данного явления занимались многие ученые – Лыков А. В. [5], Шубин Г. С. [6], Чудинов Б. С. [7]. Однако работы этих авторов предполагали изучение явления термовлагопроводности для условий нагревания древесины в насыщенной среде ($\varphi \approx 1$), т. е. прогрев в камерах с сушильным агентом – паром, пропаривание и проваривание сортиментов перед строганием и лущением.

Целью настоящей работы было определение характера изменения температуры и влажности древесины по сечению пиломатериала (внутри и на поверхности) во времени в период начального прогрева, а также определение коэффициента термовлагопроводности и изучение кинетики его изменения.

Основная часть. Современные технологии сушки предполагают использование режимов начального прогрева, при которых степень насыщенности обрабатывающей среды $\varphi < 1$, разница показаний психрометра Δt не превышает 5°С, а температура прогрева устанавливается на уровне, не превышающем температуру сушки на первой ступени режима сушки. Как правило, это не более 70°С. Следует отметить, что при таких условиях интенсивность испарения влаги с поверхности сортиментов и перемещение ее из внутренних более влажных слоев к наружным значительно ниже, чем в процессе непосредственно сушки пиломатериалов.

В период начального прогрева в ненасыщенной среде происходит испарение влаги с поверхности пиломатериалов и, как следствие, уровень температуры поверхностных слоев меньше температуры обрабатывающей среды. Данный факт можно объяснить тем, что при прогреве в ненасыщенной среде возникают два совместно протекающих явления переноса тепла: теплопроводность внутри материала и теплообмен с обрабатывающей средой [8].

Свойство древесины перемещать влагу под действием перепада (градиента) температур называется термовлагопроводностью.

Свойство термовлагопроводности древесины необходимо учитывать при проведении начального прогрева, так как влага, находящаяся в наружных зонах, нагревается сильнее, чем во внутренних, и это вызывает движение ее снаружи внутрь.

В этой связи особый интерес представляет исследование изменения термовлагопроводности древесины во время прогрева в ненасыщенной среде во времени.

Известно, что при неизотермических условиях в древесине имеет место перенос влаги из мест с большей температурой в места с меньшей. Если образец древесины с влажностью, одинаковой по сечению, поместить в неравномерное температурное поле, в результате чего будет наблюдаться перепад температур на противоположных сторонах образца, то начнется перераспределение влажности на поверхности и внутри. На участках с меньшей температурой влажность древесины увеличится, а с большей – уменьшиться. При этом в образце возникает градиент влажности, под действием которого влага будет стремиться к перемещению в направлении, противоположном направлению потока влаги. Влага по объему сортимента всегда движется в сторону убывающей влажности. При определенном соотношении между влажностным и температурным градиентами эффект влагопроводности полностью компенсирует эффект термовлагопроводности, и по сечению образца установится стационарное поле температуры и влажности.

Отношение градиента влажности к градиенту температуры при таком стационарном состоянии $\delta = \Delta W/\Delta t$ носит название термоградиентного коэффициента. Он показывает, какому перепаду влажности эквивалентно изменение температуры на 1°С [9].

Известно, что на величину термоградиентного коэффициента влажной древесины ($W > W_{\text{п.н}}$) значительное влияние оказывает температура обрабатывающего агента. Характер

этого влияния, экспериментально установленный Г. С. Шубиным [10], иллюстрируется следующим уравнением:

$$q_{m.u} = -a_m \cdot \rho_0 \cdot \Delta u , \quad (1)$$

где $q_{m.u}$ – плотность потока влаги (масса влаги, проходящая в единицу времени через единицу площади изопотенциальной поверхности – поверхности одинакового потенциала), кг влаги/(с·м^2); a_m – коэффициент влагопроводности (аналог коэффициента температуропроводности a), м^2/с; ρ_0 – плотность древесины в абсолютно сухом состоянии, кг/м^3; Δu – градиент влагосодержания, представляющий собой перепад влагосодержания, приходящийся на единицу длины пути перемещения влаги.

Следует отметить, что коэффициент термовлагопроводности является одним из основных показателей, который характеризует интенсивность перемещения потока влаги внутри древесины под действием температуры; движение влаги всегда направлено в сторону понижения температуры.

Как уже отмечалось выше, явление термовлагопроводности является причиной перемещения влаги по направлению потока теплоты. Поэтому при конвективной сушке создается перепад температур по сечению образца, противоположный перепаду влажности на поверхности и внутри древесины, что мешает передвижению влаги изнутри к поверхности материала.

Существующие методы исследования тепловых свойств древесины дают возможность определения явлений тепломассопереноса лишь при определенных стационарных условиях, т. е. когда тепловой поток, проходящий через древесину, сохраняется постоянным во времени.

В данной исследовательской работе особый интерес представляет нестационарный режим, который характеризуется переменным в пространстве и времени температурным полем в нагреваемом теле. Начальный прогрев древесины относится к нестационарному режиму, поскольку имеет место изменяющаяся во времени и по сечению температура самого сортимента (поверхность – внутренний слой) и температура агента обработки. Для исследования вышеописанного процесса прогрева автором предложен метод исследования, который основывается на способе комплексного определения теплофизических характеристик при теплообмене тел в среде с линейно изменяющейся температурой. Один из способов комплексного определения теплофизических характеристик в режиме линейного нагрева состоит в использовании системы тел, одно из которых имеет известные теплофизические свойства [3].

Для определения характера изменения коэффициента термовлагопроводности древесины δ во времени в период начального прогрева необходимо найти перепады температур Δt и влажности ΔW по сечению образца, а также определить характер влияния параметров режима начального прогрева (температура и степень насыщенности обрабатывающей среды и начальная влажность образца) на величину δ.

Величина перепадов Δt и ΔW фиксируется через равные промежутки времени, когда тепловой поток сохраняется постоянным.

Для определения температуры внутри и на поверхности древесины применяли измерительную систему, имеющую температурные датчики модели DS18S20 и датчики влажности модели HCH-1000-001 HONEY. На поверхности образца древесины устанавливается по три термодатчика $T_{1–3}$, $W_{1–3}$, а на глубине, соответствующей половине толщины образца из древесины, располагаются термодатчики $T_{4–6}$, $W_{4–6}$. Все датчики были изолированы пастой КПТ-8 во избежание влияния обрабатывающего агента на результаты измерений.

Для обеспечения нагрева образца древесины вышеописанную систему пластин помещали в климатическую камеру. Температуру и степень насыщенности обрабатывающего воздуха устанавливали и поддерживали с помощью системы автоматического контроля. Показания всех датчиков фиксировали с точностью 0,5°С с периодичностью 20 мин. Прогрев проводили до тех пор, пока разница температур на поверхности и внутри древесины не составляла 0,5°С. Влажность образцов определяли с помощью влагомера марки GANN HT 85. Условия проведения экспериментальных пластин представлены в таблице (см. далее).

В данных исследованиях в целях упрощения были приняты некоторые допущения и ограничения. В отношении распространения тепла по поперечному сечению доски древесину можно приравнять к изотропному телу, за исключением случаев, когда предопределено достаточно ориентированное направление теплового потока в радиальном или в тангенциальном направлении. Начальная температура древесины считалась одинаковой по всему объему, температура среды постоянной как над всей поверхностью материала, так и во времени. Было принято, что тепло распространяется лишь в направлении по толщине материала, имеющего форму бесконечной пластины.

Результаты исследований по условиям таблицы представлены в виде графических зависимостей на рис. 1–4.

Условия проведения эксперимента для толщины образцов 32, 40, 50 мм

Степень насыщенности φ	Начальная влажность, %	Температура прогрева, °С	Степень насыщенности φ	Начальная влажность, %	Температура прогрева, °С
φ = 0,73	25	40	φ = 0,87	25	40
		50			50
		60			60
		70			70
		80			80
	50	40		50	40
		50			50
		60			60
		70			70
		80			80
	75	40		75	40
		50			50
		60			60
		70			70
		80			80

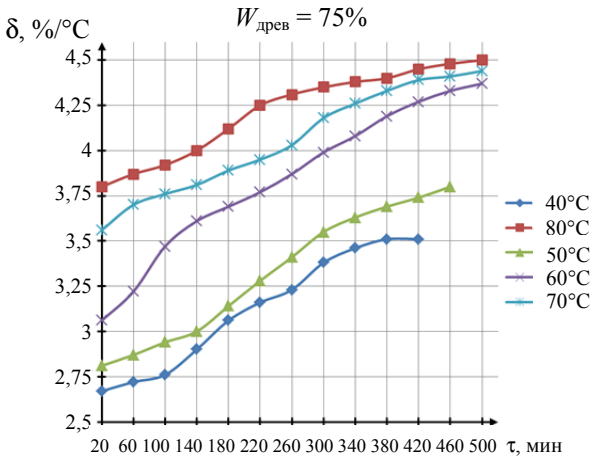


Рис. 1. Зависимость коэффициента термовлагопроводности от температуры прогрева во времени при φ = 0,73 и $W_{древ}$ = 75%

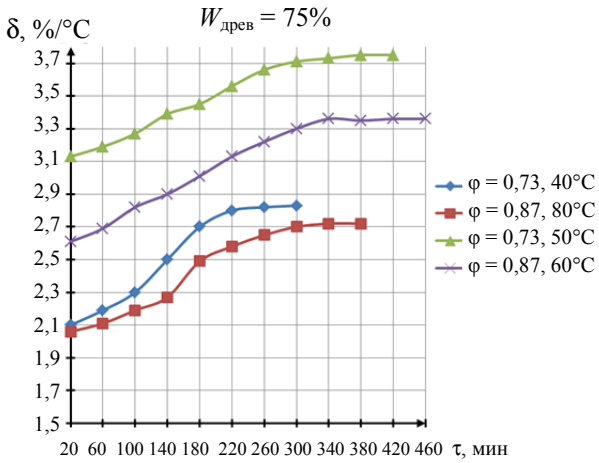


Рис. 3. Зависимость коэффициента термовлагопроводности от температуры прогрева во времени при различных режимах начального прогрева при $W_{древ}$ = 25%

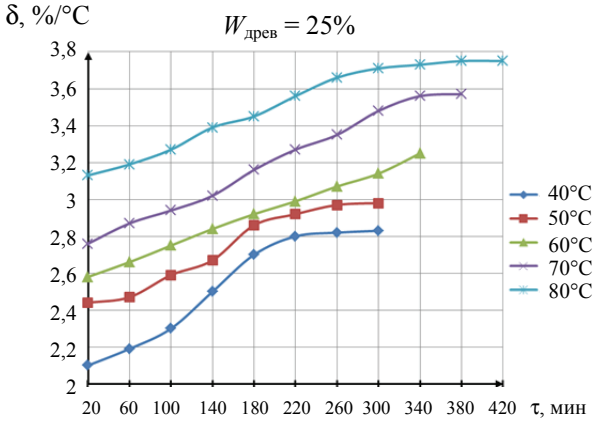


Рис. 2. Зависимость коэффициента термовлагопроводности от температуры прогрева во времени при φ = 0,73 и $W_{древ}$ = 25%

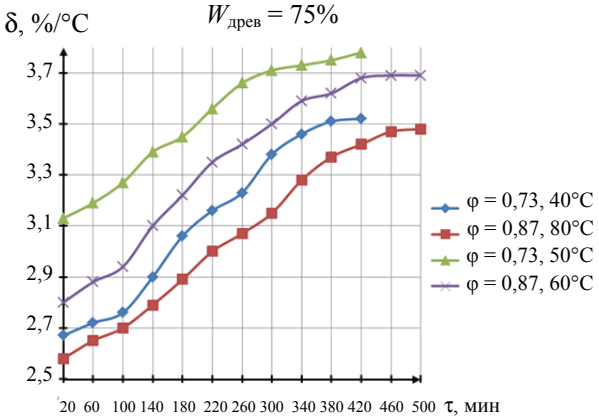


Рис. 4. Зависимость коэффициента термовлагопроводности от температуры прогрева во времени при различных режимах начального прогрева при $W_{древ}$ = 75%

Температура воздуха в климатической камере устанавливается на требуемом уровне (40–80°С) уже через 3–10 мин после начала нагревания. После этого она остается неизменной на протяжении всего эксперимента. Таким образом, можно считать, что нагревание древесины проходит при постоянной температуре обрабатывающей среды.

Нагревание поверхностных слоев образцов древесины начинается сразу, а внутренних – с некоторым опозданием. Через 60–80 мин после начала процесса разница температур на поверхности и внутри образцов достигает максимальной величины.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что на величину коэффициента термовлагопроводности существенное влияние оказывает температура прогрева. Так, из рис. 1 и 2 можно отметить, что при температуре 40–50°С и влажности образца $W_{древ}$ = 75% величина δ в равные промежутки времени отличается незначительно (на десятые доли). При температуре 70–80°С наблюдается увеличение значения δ на 25%.

Интересен тот факт, что изменение значения δ при $W_{древ}$ = 25% происходит равномерно, а при $W_{древ}$ = 75% можно заметить некий перепад между температурами 50 и 60°С. Этот факт можно объяснить существенным изменением влагосодержания и теплосодержания обрабатывающего воздуха при температуре 50 и 60°С и φ = 0,73 (по *Id*-диаграмме).

Величина коэффициента термовлагопроводности для различных условий эксперимента изменяется в пределах от 1,9 до 4,5 %/°С. Полученные значения не противоречат сведениям, имеющимся в литературе [11].

Анализ данных на рис. 3 и 4 показывает влияние степени насыщенности обрабатывающего агента при фиксированной температуре на величину δ через равные промежутки времени. При влажности образца $W_{древ}$ = 25% величина коэффициента δ при температуре 40°С и значениях φ 0,73 и 0,87 отличается в среднем на 8%, причем чем выше степень насыщенности, тем меньше коэффициент δ. При температуре прогрева t = 80°С величина коэффициента δ при φ = 0,73 больше на 20%, чем при φ = 0,87.

Таким образом, на интенсивность возрастания величины термоградиентного коэффициента также оказывают влияние степень насыщенности обрабатывающей среды и начальная влажность образца.

Полученные данные можно использовать при разработке режимов начального прогрева древесины в ненасыщенной среде. Для оптимальной подготовки влагопроводящей системы древесины к испарению влаги можно рекомендовать проводить прогрев древесины при температуре среды выше 50–60°С и φ = 0,75–0,85.

Заключение. В период прогрева древесины наблюдается заметный перепад температур на поверхности и внутри образца, что является причиной формирования неравномерного температурного поля по сечению древесины.

В свою очередь, возникновение разницы температур является причиной перемещения влаги по направлению потока теплоты.

В результате проведенных исследований достигнуты следующие результаты:

– определен характер изменения температуры поверхностных и внутренних слоев древесины во времени при различных условиях обрабатывающей среды;

– определен характер изменения влажности поверхностных и внутренних слоев древесины во времени при различных условиях обрабатывающей среды;

– определен характер зависимости коэффициента термовлагопроводности от условий обрабатывающей среды во времени;

– произведена оценка влияния влажности древесины, толщины образца, степени насыщенности и температуры обрабатывающей среды на величину коэффициента термовлагопроводности и на характер ее изменения во времени.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что на величину коэффициента термовлагопроводности влияние оказывают все переменные факторы, что подтверждает необходимость разработки режимов прогрева, которые учитывают их все.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке ресурсосберегающих режимов начального прогрева.

Список литературы

1. Кречетов И. В. Сушка и защита древесины. М.: Лесная промышленность, 1987. 324 с.

2. Кречетов И. В. Сушка древесины. М.: Лесная промышленность, 1980. 432 с.

3. Рудак О. Г., Снопков В. Б. Изменение тепловых свойств древесины в период прогрева в ненасыщенной среде // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 46–49.

4. Рудак О. Г., Дорожко В. В., Мазаник Н. В. Особенности проведения начального прогрева замороженной древесины // Труды БГТУ. 2013. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 57–61.

5. Лыков А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. М.: ГосЭнергоИздат, 1956. 463 с.

6. Шубин Г. С. О коэффициентах переноса тепла и влаги в древесине // Деревообраб. пром-сть. 1989. № 8. С. 10–13.

7. Чудинов Б. С. Теория тепловой обработки древесины. М.: Наука, 1968. 255 с.

8. Серговский П. С., Расев А. И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины: учеб. для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Лесная промышленность, 1987. 360 с.

9. Лыков А. В. Методы определения теплопроводности и температуропроводности. М.: Энергия, 1973. 247 с.

10. Шубин Г. С. Сушка и тепловая обработка древесины. М.: Лесная промышленность, 1990. 335 с.

11. Шубин Г. С. О термовлагопроводности коллоидных капиллярно-пористых тел // Материалы VI Всесоюзной конференции по тепломассообмену, г. Минск, 8–10 окт. 1980 г. / Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова. Минск, 1980. Т. VII. С. 18–25.

References

1. Krechetov I. V. *Sushka i zaschita drevesiny* [Drying and wood protection]. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1987. 324 p.

2. Krechetov I. V. *Sushka drevesiny* [Drying of wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1980. 432 p.

3. Rudak O. G., Snopkov V. B. Change of thermal properties of wood during heating in unsaturated medium. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 181–185 (In Russian).

4. Rudak O. G., Dorozhko V. V., Mazanik N. V. Peculiarities of initial heating of frozen wood. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 123–128 (In Russian).

5. Lykov A. V. *Teplo- i massoobmen v protsessakh sushki* [Heat and mass exchange in drying processes]. Moscow, GosEnergoPublishing, 1956. 463 p.

6. Shubin G. S. On heat and moisture transfer coefficient in wood. *Derevoobrabatyvayschaya promyshlennost* [Woodworking industry], 1989, no. 8, pp. 10–13 (In Russian).

7. Chudinov B. S. *Teoriya teplovoy obrabotki drevesiny* [Theory of wood heat treatment]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 255 p.

8. Sergovsky P. S., Rasev A. I. *Gidrotermicheskaya obrabotka i konservirovaniye drevesiny: uchebnik dlya vuzov* [Hydrothermal processing and preservation of wood: textbook for universities]. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1987. 360 p.

9. Lykov A. V. *Metody opredeleniya teploprovodnosti i temperaturoprovodnosti* [Methods of determining thermal conductivity and thermal conductivity]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 413 p.

10. Shubin G. S. *Syshka i teployaya obrabotka drevesiny* [Drying and thermal processing of wood]. Moscow, Lesnaya Promyshlennost Publ., 1990. 335 p.

11. Shubin G. S. On thermal conductivity of colloidal capillary-porous bodies. *Materialy VI Vsesoyuznoy konferentssii po teplomassoobmenu* [Materials of the VI All-union conference on heat and mass exchange]. Minsk, 1980, vol. 7, pp. 18–25 (In Russian).

Информация об авторе

Рудак Оксана Геннадьевна – магистр технических наук, ассистент кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: oksrudak@mail.ru

Information about the author

Rudak Oksana Gennadievna – Master of Engineering, Assistant Lecturer, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., Minsk, 220006, Republic of Belarus). E-mail: oksrudak@mail.ru

УДК 674.816.2

И. Г. Федосенко, И. И. Веретиков
Белорусский государственный технологический университет

ПРИМЕНЕНИЕ КОРЫ ДЕРЕВЬЕВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗОЛИРУЮЩИХ И КОНСТРУКЦИОННЫХ ПЛИТ

В статье описывается исследование влияния структурообразующих факторов на физико-механические свойства гипсо-корьевых композиционных материалов.

Оценено влияние фракционного состава коры и вспенивающего лигнинсодержащего агента на эксплуатационные свойства гипсовых плит. В качестве оцениваемых свойств выбраны: предел прочности при статическом изгибе, плотность и теплопроводность.

Показано, что хороший теплоизолирующий эффект с сохранением эксплуатационных характеристик достигается при использовании частиц размерами от 2 до 5 мм. Включение в состав лигнинсодержащего агента значительно снижает прочность при недостаточной теплоэффективности. Использование извести в составе смеси помогает снизить радиоактивный фон коры древесины, заготовленной в местах, пострадавших от аварии на ЧАЭС, и других аналогичных районах.

Полученные данные помогут спланировать свойства композиционных материалов на основе коры и минеральных вяжущих в процессе производства. Выбор индивидуальных рецептур композиционных материалов для изготовления отдельных изделий и элементов конструкций позволит обеспечить рациональную стоимость объектов конструирования.

Ключевые слова: кора, гипс, плита, вспенивающий агент, прочность, плотность, теплопроводность, структура, фракция, наполнение.

I. G. Fedosenko, I. I. Veretikov
Belarusian State Technological University

APPLICATION OF TREE BARK IN THE PRODUCTION OF INSULATING AND STRUCTURAL PLATES

The article describes the study of the influence of structure-forming factors on the physicomechanical properties of gypsum-measles composite materials.

The influence of the fractional composition of the crust and the foaming lignin-containing agent on the performance properties of gypsum boards is evaluated. The following properties were selected as the evaluated properties: tensile strength under static bending, density and thermal conductivity.

It is shown that a good heat-insulating effect while maintaining operational characteristics is achieved when using particles with sizes from 2 to 5 mm. The inclusion of a lignin-containing agent in the composition significantly reduces strength with insufficient heat efficiency. The use of lime in the mixture helps to reduce the radioactive background of the bark of wood harvested in places affected by the Chernobyl accident and other similar areas.

The data obtained will help to plan the properties of composite materials based on bark and mineral binders in the production process. The choice of individual formulations of composite materials for the manufacture of individual products and structural elements will ensure a rational cost of design objects.

Key words: bark, gypsum, plate, blowing agent, strength, density, thermal conductivity, structure, fraction, filling.

Введение. При переработке древесины образуется множество вторичных древесных ресурсов, применения которым ранее не находили и утилизировали их как не имеющие ценности отходы. С развитием новых технологий и оценочных подходов к жизнедеятельности человека такие ресурсы находят все больше областей применения и замещают вредные материалы, производимые из продуктов переработки нефти. Одним из таких ресурсов с раскрываемой сегодня ценностью является кора деревьев [1].

В Республике Беларусь кора выделяется в обособленный ресурс в основном при окорке круглых лесоматериалов перед механической обработкой, требующей получения чистой древесины.

Использование коры в производстве конструкционных материалов позволит улучшить экологию путем вовлечения в оборот естественного углерода. За счет введения в общий объем изделия кора снизит потребление более дорогих материалов, увеличит звукотеплоизоляционные свойства продукта [2], а за счет цветового контраста и проницаемости для жидких красителей – улучшит эстетическое восприятие.

Желание создать здоровые условия существования заставляет человека переосмыслить окружающее пространство и вызывает желание погрузиться в первозданную красоту природы. Так, в последние годы в Европе набирает популярность использование цельнолистовой коры,

заготовленной с живого или свежеспиленного дерева тополя. Такой материал отлично подходит как для защиты от атмосферных воздействий, так и для внутренней отделки стен [3].

Тем не менее основная практика использования коры сосредоточена на переработке отходов изготовления бутылочных пробок. Пробки традиционно изготавливают из коры пробкового дуба (Quercus suber). Не весь материал подходит для использования по назначению, так как может не соответствовать нужным показателям однородности, толщины и механической стойкости. Существует масса технологий, позволяющих использовать отходы пробки в народном хозяйстве. Наиболее интересной технологией является: измельчение коры до размера 20 мм, сортировка от примесей и мелочи, пропаривание в автоклаве при температуре 400°С, в результате которого частицы увеличиваются в размерах и выделяют вещества, являющиеся связующим, формование и охлаждение до комнатной температуры [4]. Полученный материал (Expanded Cork) имеет размеры 1000×500 мм и толщину от 10 до 300 мм (в ЕС стоимость составляет 4,31–75,94 евро за 1 м^3 соответственно). Он используется для тепло- и звукоизоляции зданий, изготовления стеновых блоков, изделий интерьера и мебели. Аналогичным способом изготавливают плитку «Natural cork compact» [5], имеющую большие размеры: 1024×1024 мм. Плотность такого материала всего 120 кг/м^3, что обеспечивает уникальные изолирующие свойства. Так, удельная теплоемкость этого материала достигает 2100 Дж/кг·К, что в 1,5–2 раза выше, чем у синтезированных нефтехимических изоляционных материалов.

Еще в Советском Союзе были освоены древесно-корьевые плиты плотностью 600–800 кг/м^3 на клеевых связующих [6], таких как сульфитно-спиртовая барда или фенолформальдегидные смолы. Без связующих прессовали лишь плиты на основе хвойной коры, чаще еловой, которую заготавливали длинными лентами. Наиболее подходящим для гипсо-корьевых плит вариантом является создание гомогенных пустот при добавлении вспенивающих добавок на стадии сухого смешивания компонентов.

Известны материалы из коры, где в качестве вяжущего использовали гипс или цемент (королит). Кроме того, кора использовалась для производства легких бетонов в качестве наполнителя (не более 50% по массе).

Учитывая экологическую обстановку Республики Беларусь, в большей части спелой древесины содержатся изотопы: цезий-137 и стронций-90 [7, 8, 9]. При этом основная концентрация этих элементов находится именно в коре, так как она является внешней преградой дерева от окружающей среды. Использование такой коры для производства изделий и материалов для жилища в чистом виде затруднительно.

Основная часть. На первом этапе работ предпринята попытка решить проблему с утилизацией загрязненной радионуклеидами коры. В результате остановились на производстве плит и панелей, где кора связывается гипсовым вяжущим с добавлением извести как природной редуцирующей [10, 11] и пластифицирующей добавки, снижающей радиационный фон по Cs-137, в нашем случае в среднем в 10 раз.

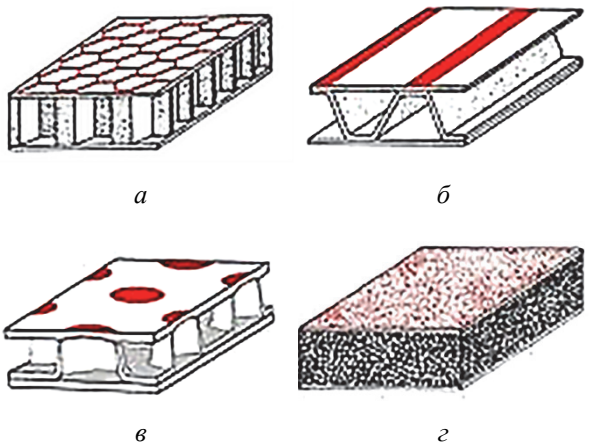
В результате подготовки образцов для исследований было обнаружено высокое декоративное свойство гипсовых плит с наполнителем из коры. Оригинальный пестрый рисунок создает большой потенциал для их использования в качестве отделочных материалов.

Внешний вид плит представлен на рис. 1.

а *б*

Рис. 1. Внешний вид плит
на основе гипса и частиц коры крупнее 2 мм:
а – средне наполненная частицами коры;
б – предельно наполненная частицами коры

Для получения плит с наибольшим термическим сопротивлением используют структурирование материалов. Принцип структурообразования облегченных плит показан на рис. 2.



а *б*

в *г*

Рис. 2. Принцип структурообразования
облегченных плит:
а, *б*, *в* – структура с упорядоченными пустотами;
г – структура с гомогенными пустотами

Для дальнейшего изучения было решено оценить эксплуатационные свойства этих плит в зависимости от размеров частиц коры. В качестве этих свойств были выбраны: прочность при статическом изгибе, плотность и теплопроводность (в том числе термическое сопротивление).

Наиболее подходящим для гипсо-корьевых плит вариантом является создание гомогенных пустот при добавлении вспенивающего агента на стадии сухого смешивания компонентов. Так получили образцы, представленные на рис. 3. В качестве вспенивающего агента использовали лигносодержащее вещество (ЛсВ), обладающее адгезионными свойствами к древесине. Применялась добавка 5, 7 и 10% (ЛсВ5, ЛсВ7 и ЛсВ10) по массе гипса.

а

б

Рис. 3. Внешний вид плит на основе гипса и частиц коры с добавлением вспенивающего агента:
а – с частицами сосновой коры размером менее 2 мм;
б – с частицами сосновой коры размером от 2 до 5 мм

Испытывались предельно наполненные корой плиты. Так, при смешивании была выбрана пропорция 1:1 для гипса и коры по объему, так как больший объем коры препятствовал целостности материала.

Определение плотности и теплопроводности проводили согласно методике к прибору [12] на образцах размерами 100×100 мм, выпиленных из отлитых плит. Прочность при статическом изгибе оценивали согласно ГОСТ 26816 [13].

Результаты определения эксплуатационных показателей представлены в процентах к значениям показателей контрольных отливок плит из гипса марки Г-4 (Г) в таблице.

Свойства гипсо-корьевых плит

Маркировка образцов	Прочность, %	Плотность, %	Теплопроводность, %
Г+ЛсВ10	–49	+16	–33
Г+КК	–65	–56	–68
Г+КК+ЛсВ5	–77	–32	–53
Г+КК+ЛсВ7	–78	–36	–56
Г+КК+ЛсВ10	–81	–43	–60
Г+МК	–77	–37	–56
Г+МК+ЛсВ5	–90	–46	–64
Г+МК+ЛсВ7	–91	–45	–67
Г+МК+ЛсВ10	–91	–46	–69

Была отмечена положительная тенденция к снижению плотности или веса получаемой плиты и ее теплопроводности, т. е. к улучшению теплоизолирующего эффекта. Зависимость тепловопроводности гипсо-корьевых плит от размеров частиц коры представлена на рис. 4.

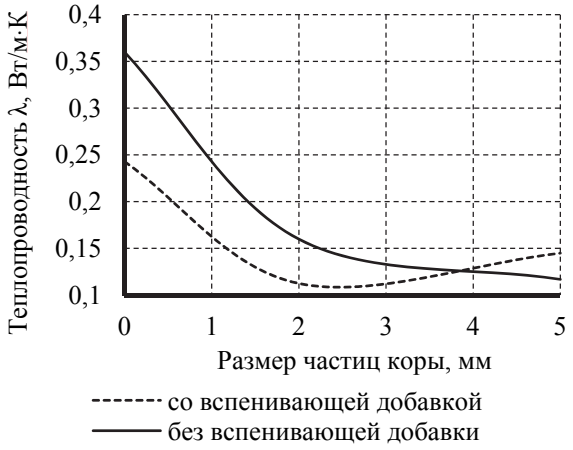


Рис. 4. Зависимость теплопроводности гипсо-корьевых плит от размеров частиц коры

Однако стоит отметить и значительное снижение прочности при статическом изгибе, которое ограничивает использование таких плит как конструкционных.

Также по результатам исследований можно сделать заключение о том, что для сохранения эксплуатационных свойств все же не стоит использовать частицы коры размерами менее 2 мм, так как это не приводит к значительному теплоизолирующему эффекту, но при этом критически снижает прочность материала. Значительный теплоизолирующий эффект при использовании коры без добавок лигносодержащего вещества может быть обусловлен ускоренным отверждением самого гипса и выделением достаточного количества пузырьков газа при реакции смеси на поверхности коры. Гипс Г-4 отверждается также не без пустот [14], и этот факт отражен в некотором увеличении плотности при добавлении в смесь лигносодержащих веществ.

Заключение. Армирование стеклосеткой или картоном может решить проблему дефицита прочности получаемого материала [15], однако в таком случае эстетические свойства материала полностью маскируются.

Получение плит и декоративных панелей, в том числе из мозаики, позволит наиболее эффективно использовать отходы окорки древесины. Хороший теплоизолирующий эффект с сохранением эксплуатационных характеристик достигается при использовании частиц размерами от 2 до 5 мм. Включение извести в состав смеси помогает снизить радиоактивный фон коры древесины, заготовленной в местах, пострадавших от аварии на ЧАЭС, и других аналогичных районах.

Список литературы

1. Цывин М. М. Использование древесной коры. М.: Лесная промышленность, 1973. 96 с.

2. Gil L. Cork as a building material. technical manual. Santa Maria de Lamas, Portugal: APCOR 2007. P. 325

3. Федосенко И. Г. Перспективы использования коры деревьев в эко-дизайне экстерьера и интерьера зданий // Технология и техника лесной промышленности: тезисы 83-й науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. сотр. и асп. (с междунар. участием), г. Минск, 4–15 фев. 2019 г. / отв. за издание И. В. Войтов. Минск: БГТУ, 2019. С. 61–62.

4. Gil L. Process for the production of cork powder agglomerates, without glues, through predepolymerization of suberin and polymerization by pressing and heating. PT88239. Portuguese Patent. Published August 04, 1994.

5. Panelesaislantes de corcho natural compoctado [Электронный ресурс]. URL: http://www.decoproyecandalucia.com/paneles-de-corcho (дата обращения: 12.03.2020).

6. Коротаев Э. И. Производство строительных материалов из древесных отходов. М.: Лесная промышленность, 1972. 143 с.

7. Булавик И. М., Переволоцкий А. Н. Влияние различных факторов на накопление Cs древесными растениями // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. Ин-та леса НАН Беларуси. Гомель, 1996. Вып. 49. С. 148–160.

8. Гайдуль А. З., Переволоцкий А. Н., Булавик И. М. Распределение радионуклидов 137 Cs и 90 Sr в радиальном направлении ствола // Лес, наука, молодежь: материалы Междунар. науч. конф. Гомель: ИЛ НАН Беларуси, 1999. Т. 2. С. 19–21.

9. Булко Н. И., Шабалева М. А. Особенности вертикальной миграции Cs-137 и Sr-90 в сопряженных типах леса // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. Ин-та леса НАН Беларуси. Вып. 66. Гомель: ИЛ НАН Беларуси, 2006. С. 94–104.

10. Клебанович Н. В. Влияние известкования на поступление радиоцезия в растениеводческую продукцию // Третий съезд по радиационным исследованиям: тез. докл., г. Москва, 14–17 окт. 1997 г. / Междунар. ассоц. академ. наук. Пущино, 1997. Т. 2. С. 453–454.

11. Роль химии в реабилитации сельскохозяйственных угодий, подвергшихся радиоактивному загрязнению / Н. И. Санжарова [и др.] // Российский химический журнал / под ред А. В. Пуховского. 2005. № 3. С. 26–34.

12. Измеритель теплопроводности ИТП-МГ4. Руководство по эксплуатации. Э 12.102.010 РЭ [Электронный ресурс]. URL: http://www.stroypribor.com/netcat_files/316/175/manual_itp.pdf. (дата обращения: 12.03.2020).

13. Плиты цементно-стружечные. Технические условия: ГОСТ 26816–2016. Введ. 01.04.2018. М.: Стандартинформ, 2016. 20 с.

14. Федосенко И. Г., Усович А. В. Производственное планирование свойств древесных материалов на основе минеральных вяжущих // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2018. № 2 (210). С. 224−229.

15. Сенаторов Н. Я., Коршунова А. П., Муштаева Н. Е. Лепные работы. М.: Высшая школа, 1987. 240 с.

References

1. Tsyvin M. M. *Ispol'zovaniye drevesnoy kory* [Use of tree bark]. Moscow, Forestry Publ., 1973. 96 p.

2. Gil L. Cork As a Building Material. Technical Manual. Santa Maria de Lamas, Portugal, APCOR 2007. P. 325.

3. Fedosenko I. G. Prospects for the use of tree bark in the eco-design of the exterior and interior of buildings. *Tekhnologiya i tekhnika lesnoy promyshlennosti: tezisy 83-y nauch.-tekhn. konf. prof.-prepod. sostava, nauch. sotr. i asp. (s mezhdunar. uchastiem)* [Technology and technique of the forest industry: theses

of the 83rd scientific-technical conference of faculty, researchers and graduate students (with international participation)]. Minsk, BSTU Publ., 2019, pp. 61–62 (In Russian).

4. Gil L. Process for the production of cork powder agglomerates, without glues, through pre-depolymerization of suberin and polymerization by pressing and heating. PT88239. Portuguese Patent. Published August 04, 1994.

5. Panelesaislantes de corcho natural compoctado. Available at: http://www.decoproyecandalucia.com/paneles-de-corcho (accessed 12.03.2020).

6. Korotaev E. I. *Proizvodstvo stroitel'nykh materialov iz drevesnykh otkhodov* [Production of building materials from wood waste]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1972. 143 p.

7. Bulavik I. M., Perevolotsky A. N. The influence of various factors on the accumulation of Cs by woody plants. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva: sb. nauch. tr. In-ta lesa NAN Belarusi* [Problems of forest science and forestry. Scientific works of the Institute of NASB]. Gomel, 1996, vol. 49, pp. 148–160 (In Russian).

8. Gaidul A. Z., Perevolotsky A. N., Bulavik I. M. The distribution of radionuclides 137 Cs and 90 Sr in the radial direction of the barrel. *Les, nauka, molodyozh: materialy Mezhdunar. nauch. konf.* [Forest, Science, Youth: Mater. Int. scientific conf.]. Gomel, IL NAN Belarusi, 1999, vol. 2, pp. 19–21 (In Russian).

9. Bulko N. I., Shabaleva M. A. Features of the vertical migration of Cs-137 and Sr-90 in conjugated forest types. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva: sb. nauch. tr. In-ta lesa NAN Belarusi* [Problems of forest science and forestry: collection of scientific papers of the National Academy of Sciences of Belarus]. Vol. 66. Gomel, IL NAN Belarusi, 2006, pp. 94–104 (In Russian).

10. Klebanovich N. V. The effect of liming on the receipt of radiocesium in crop production. *Tretiy s'ezd po radiatsionnym issledovaniyam* [Third congress on radiation research]. Pushchino, 1997, vol. 2, pp. 453–454 (In Russian).

11. Sanzharova N. I., Sysoeva A. A., Isamov N. N., Aleksakhin R. M., Kuznetsov V. K., Zhigareva T. L. The role of chemistry in the rehabilitation of agricultural land exposed to radioactive contamination. *Rossiyski khimicheskiy zhurnal* [Russian chemical journal], 2005, no. 3, pp. 26–34 (In Russian).

12. Thermal conductivity meter ITP-MG4. Manual. E 12.102.010 RE. Available at: http://www.stroypribor.com/netcat_files/316/175/manual_itp.pdf (accessed 03.12.2020).

13. GOST 26816-2016. Cement-bonded slabs. Technical conditions. Moscow, Standardinform Publ. 2016. 20 p. (In Russian)

14. Fedosenko I. G., Usovich A. V. Production planning of the properties of wood materials based on mineral binders. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], Issue 1, Foresty, Nature Management and Renewable Resources Processing, 2018, no. 2 (210), pp. 224−229 (In Russian)

15. Senatorov N. Ya., Korshunova A. P., Mushtaeva N. E. *Lepnyye raboty* [Stucco work]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987. 240 p.

Информация об авторах

Федосенко Иван Гавриилович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии деревообработки. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Ivan.fedosenko@mail.ru

Веретиков Игорь Иванович – магистр технических наук, ассистент кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: veretikov.igor@mail.ru

Information about the author

Fedosenko Ivan Gavriilovich – PhD (Engineering), Associate Professor, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Ivan.fedosenko@mail.ru

Veretikov Igor Ivanovich – Master of Engineering, Assistant Lecturer, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: veretikov.igor@mail.ru

Поступила 11.03.2020

УДК 674. 048

А. Ю. Бовтрель[1], И. К. Божелко[1], А. Ю. Клюев[1],
Е. Д. Скаковский[2], Е. В. Дубоделова[1]
[1]Белорусский государственный технологический университет
[2]Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси

ОЦЕНКА АНТИСЕПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ КАНИФОЛИ

Показана целесообразность использования в составе антисептических средств для защиты целлюлозосодержащей продукции в виде канатной пряжи и древесины, модифицированной диаминами канифоли. Анализ качественного и количественного состава образцов канифоли, обоснованно проведенный методом ядерного магнитного резонанса, показал, что модификации возможно подвергать как сосновую живичную, так и диспропорционированную канифоль. Установлено, что в качестве модификаторов канифоли из ряда диаминов целесообразно применять диэтилентриамин и гексаметилендиамин. При этом реакцию необходимо проводить при температуре (190 ± 5)°С в течение от 3 до 6 ч с осуществлением периодического контроля по кислотному числу. Эффективность модификации подтверждают результаты анализа ЯМР спектров в области ароматических и олефиновых сигналов. Антисептические составы с использованием модифицированной вышеназванными диаминами канифоли подавили рост спор гриба *Aspergillus niger*, отличающегося повышенной устойчивостью к действию антисептиков, при концентрации их в вакуумном дистилляте, равной 12,5%, в сравнении с контрольным образцом антисептика (промышленным нафтенатом меди), проявившего фунгицидные свойства при концентрации 15% и выше. Установлено, что оптимальное соотношение в антисептических средствах модифицированной канифоли составляет 25–30 мас. % при использовании в качестве пленкообразователя битума или алкилфенолформальдегидной смолы, а в качестве растворителя – скипидара или ксилола. Это позволило обеспечить защиту целлюлозы канатной пряжи и древесины от плесневых, деревоокрашивающих и дереворазрушающих грибов, что подтверждено испытаниями, проведенными в соответствии с ГОСТ 30028.4, ГОСТ 16712. Высказаны рекомендации к промышленному внедрению антисептических средств для защиты целлюлозосодержащей продукции в виде канатной пряжи и древесины, модифицированной диэтилентриамином и гексаметилендиамином канифоли.

Ключевые слова: древесина, канифоль, диамин, фунгицидные свойства, биозащита.

A. Yu. Bovtrel'[1], I. K. Bozhelko[1], A. Yu. Klyuyev[1],
Ye. D. Skakovskiy[2], Ye. V. Dubodelova[1]
[1]Belarusian State Technological University
[2]Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus

ASSESSMENT OF ANTISEPTIC PROPERTIES OF COMPOSITIONS BASED ON ROSIN

The expediency of using antiseptic agents to protect cellulose-containing products in the form of rope yarn and wood modified with diamines rosin has been shown. Analysis of the qualitative and quantitative composition of rosin samples, reasonably carried out by the method of nuclear magnetic resonance, showed that it is possible to modify both pine gum and disproportionate rosin. It has been established that diethylenetriamine and hexamethylenediamine are useful as rosin modifiers from a number of diamines. In this case, the reaction must be carried out at a temperature of (190 ± 5)°C for 3 to 6 hours with periodic monitoring by acid number. The effectiveness of the modification is confirmed by the results of the analysis of NMR spectra in the field of aromatic and olefin signals. Antiseptic compositions using rosin modified with the above diamines suppressed the growth of spores of *Aspergillus niger* fungus, which is highly resistant to antiseptics, when their concentration in the vacuum distillate is 12.5% in comparison with a control sample of antiseptics (industrial copper naphthenate), which has fungicidal properties at a concentration of 15% and above. It has been established that the optimal ratio of modified rosin in antiseptic agents is 25–30 wt. % When using bitumen or alkyl phenol formaldehyde resin as a film former, and turpentine or xylene as a solvent. This made it possible to protect the pulp of rope yarn and wood from mold, wood-dyeing and wood-destroying fungi, which is confirmed by tests carried out in accordance with GOST 30028.4,

GOST 16712. Recommendations are made for the industrial introduction of antiseptic agents to protect cellulose-containing products in the form of rope yarn and wood modified with diethylene triamine and hexamethylene diamine rosin.

Key words: wood, rosin, diamine, fungicidal properties, bioprotection.

Введение. Целью работы является оценка возможности расширения ассортимента антисептических средств на основе местного сырья, которые могут быть применимы для защиты целлюлозосодержащей продукции. Это объясняется тем, что в практической деятельности человека широко используются природные материалы, основой которых является целлюлоза: древесина, бумага, хлопок, лен, пенька и др. В то же время целлюлозные материалы служат источником углеродного питания для многих живых организмов, в первую очередь для мицелиальных грибов. Воздействие микроорганизмов на целлюлозу избирательно и зависит от тех условий, в которых находится сам материал.

Целлюлоза в составе канатной пряжи, используемая как органический сердечник для стальных канатов и несущая функцию носителя смазки для защиты стали, подвергается воздействию плесневых грибов.

Наибольший ущерб древесине причиняют дереворазрушающие грибы родов *Serpula* и *Coniophora*, вызывающие бурую гниль древесины и относящиеся к так называемым домовым грибам. Грибы бурой гнили утилизируют в основном целлюлозу, оставляя темные аморфные участки, которые от прикосновения легко рассыпаются в порошок [1]. Низшие (плесневые) грибы имеют сравнительно невысокую дереворазрушающую способность, но быстро разрушают волокнистые материалы. Они могут воздействовать за пределами возможностей высших грибов, более устойчивы к неблагоприятным факторам и многим антисептикам [2].

Среди мер борьбы с биоповреждениями материалов первое место занимают химические средства защиты – антисептические составы (АС). Они должны отвечать ряду требований: быть токсичными по отношению к грибам и насекомым, но безвредными для человека и животных, хорошо проникать в материал, быть стойкими во времени, не снижать прочность, не портить внешнего вида, не вымываться водой и т. д. Важными требованиями также являются биозащищаемость, высокие антикоррозионные и адгезивные свойства. Сроки эксплуатации после антисептирования целлюлозных материалов значительно повышаются.

На сегодняшний день импортные АС существенно эффективнее (качественнее) отечественных, однако их применение требует больших валютных затрат. Несмотря на достаточно большой выбор АС, проблема защиты материалов, изделий и сооружений от биологического повреждения по-прежнему является актуальной, так как только учтенные потери от биоповреждений составляют 5–7% стоимости мировой промышленной продукции и имеют тенденцию к росту.

В настоящее время на рынке стран СНГ преобладают традиционные хлорсодержащие антисептические средства (хлорамин, гипохлорит и др.), нафтенат меди, препараты, содержащие α-пирен, а также фенольные препараты, которым свойственен ряд существенных недостатков: высокая токсичность, относительно невысокая активность в отношении большинства патогенных микроорганизмов и грибков. Кроме того, их рабочие растворы малостабильны, коррозионно активны, имеют выраженный запах, раздражают кожу и слизистые оболочки, повреждают защищаемые материалы.

АС закупаются по высокой цене в Германии, Франции, Китае и т. д. Производство их в Республике Беларусь носит ограниченный характер. В Республике Беларусь основным производителем АС является ОАО «Лесохимик» (г. Борисов), который в рецептуре АС использует канцерогенный α-пирен. В то же время на ОАО «Лесохимик» осуществляется переработка сосновой живицы *Pinus Silvestris* L. На канифоль и скипидар. Известно, что канифоль вследствие своей уникальной природы является эффективным сырьем для создания на ее основе новых вторичных продуктов [3], которые могут быть использованы в композиционных составах. Сама же канифоль, вследствие невысоких потребительских свойств, ограниченно применяется в композиционных составах.

Поэтому с целью расширения возможности применения этого эффективного и уникального природного продукта целесообразно и практически важно проведение широкого комплекса исследований по созданию на его основе методами химического модифицирования новых антисептических составов, обладающих широким диапазоном антисептических и физико-химических свойств.

Предметом настоящих исследований является пеньковая пряжа, широко используемая в качестве органического сердечника, применяемого в производстве стальных канатов, древесина (строительная, деловая, бытовая) и антисептические составы, защищающие их. Так, пеньковая пряжа находит широкое применение

в таких областях, как кабельная техника, строительные и шиномонтажные работы, морские грузоперевозки, производство стальных канатов, сантехнические работы и т. д. Ввиду того что пеньковая пряжа подвержена плесневым поражениям, для эффективной ее защиты используется целая система мероприятий по применению химических средств. Они должны сочетать высокую эффективность в борьбе с агентами биоповреждений с низкой токсичностью по отношению к животным и человеку, быть экономичными, совместимыми с другими компонентами (нефтепродукты, полимерные материалы и т. д.).

Для антисептирования древесины используют водорастворимые, органорастворимые и масляные антисептики, а также антисептические пасты.

Деревянные строительные конструкции и изделия антисептируют различными способами: поверхностной обработкой антисептиками и последовательной пропиткой в горячей и холодной ваннах; пропиткой под давлением в автоклавах и обмазкой антисептическими пастами. В зависимости от назначения древесины и ее влажности применяют тот или иной способ антисептирования, причем глубина пропитки зависит как от способа антисептирования, так и от строения древесины.

Согласно литературным данным [4], N-(диметиламинометил)имид малеопимаровой кислоты обладает фунгицидной и бактерицидной активностями против синегнойной палочки, грибов мучнистой росы, сырой гнили и мог бы найти применение в садоводстве, цветоводстве и промышленности, если бы производство исходной малеопимаровой кислоты было налажено лесохимической промышленностью.

Известен фунгицидный состав [5] для пропитки древесины, содержащий растворимую часть (85–95% канифоли, химически модифицированной при температуре 175–180°С, и 5–15% CuO), а также органический растворитель – скипидар. Состав предохраняет лесоматериалы от загнивания и поражения насекомыми.

Состав для обработки древесины с водоотталкивающими и фунгицидными свойствами [6] содержит пентаэритритовый эфир смеси смоляных и жирных кислот в количестве 1–30%, полихлорфенол – 0,1–20,0% парафин – 4–8%, остальное – растворитель и вода. Однако недостатком таких композиций является использование в качестве фунгицидной добавки резинатов меди и полихлорфенола, которые являются высокотоксичными веществами и частично растворяются в воде, что дает возможность их вымывания из композиций, нанесенных на древесину или пряжу, тем самым увеличивая вероятность их биоповреждений. Применение нафтената меди (НФМ) в композиционных составах ограничено тем, что в процессе естественного старения и при повышенных температурах он разлагается. Образующиеся водорастворимые медные соли также вымываются из композиций и увеличивают вероятность биоповреждений защищаемого материала [7].

Известен способ получения антисептической добавки [8], заключающийся в обработке терпеномалеиновой смолы этаноламином при массовом соотношении соответственно 10 : 0,8–1,0 и температуре 150–170°С в течение 2–3 ч. Образующийся при этом N-(оксиэтил)имид терпеномалеинового аддукта (ТМА) обладает антисептическими свойствами (эффективен против аэробных и анаэробных бактерий) и используется в качестве добавки при пропитке пеньковой пряжи, применяемой при изготовлении силовых кабелей. Однако его фунгицидная активность против плесневых, дереворазрушающих и деревоокрашивающих грибов не изучена. Поэтому актуальны исследования, посвященные получению и изучению свойств антисептических средств, не содержащих связанной меди.

Целью работы является разработка способов получения антисептических составов, проявляющих фунгицидную активность по отношению к плесневым, деревоокрашивающим и дереворазрушающим грибам, на основе канифоли путем ее химического модифицирования диаминами и сравнение их активности с активностью известных антисептиков.

Основная часть. Для получения модифицированных канифолей было использовано следующее сырье: сосновая живичная канифоль (СЖК) (ОАО «Лесохимик», $T_р$ = 73°С, КЧ = 172 мг KOH/г) и диспропорционированная канифоль (ДЖК) ($T_р$ = 62°С, КЧ = 162 мг KOH/г). Катализатором диспропорционирования служил I_2 в количестве 0,5 мас. % (температура реакции Т = (220 ± 5)°С, время реакции – 2 ч).

Канифоль состоит из лабильных смоляных кислот (СК) (табл. 1), которые легко превращаются друг в друга и различные соединения, что сказывается на качестве продукции, поэтому требуются надежные и экспрессные методы их контроля. В настоящее время для анализа СК используются различные методы хроматографии. Однако эти методы имеют ряд недостатков: 1) СК необходимо переводить в метиловые эфиры; 2) не все компоненты смеси разделяются; 3) возможно разложение СК в колонке из-за высокой температуры. Ранее нами было предложено использовать метод ЯМР для анализа состава бальзамов из живицы сосны обыкновенной [9], а также самой живицы [10]. Метод ЯМР, приведенный в работах [9, 10], показал эффективность его использования для анализа смоляных

кислот канифоли. Поэтому все исследуемые образцы канифолей растворяли в $CDCl_3$ (10%). Спектры записывали на ЯМР спектрометре AVANCE-500 (500 МГц для ядер ^1H и 125 МГц для ^{13}C). Химические сдвиги сигналов протонов соединений определяли по сигналу хлороформа (δ = 7,27 м. д., примесь), а химические сдвиги ^{13}C измеряли относительно сигнала растворителя (δ = 77,7 м. д.). Для идентификации и количественного определения содержания СК были записаны спектры индивидуальных кислот: абиетиновой (1), дегидроабиетиновой (2), изопимаровой (3), левопимаровой (4), неоабиетиновой (5), палюстровой (6) и пимаровой (7). Кроме того, были записаны спектры растворов в $CDCl_3$ композиций названных канифолей, обработанных 30%-ным диэтилентриамином.

На рис. 1, *а* показан спектр ^1H ЯМР сосновой живичной канифоли, состоящий из областей поглощения ароматических, олефиновых и алифатических протонов. Видно, что наиболее удобны для анализа первые две области (рис. 1, *б*). Цифрами обозначены линии, принадлежащие соответствующим СК.

Рис. 2, *а* отображает ^{13}C ЯМР спектр этого же образца. Поскольку все линии практически индивидуальны, для анализа можно использовать весь спектр, но наиболее удобна область поглощения ароматических и олефиновых углеродов (рис. 2, *б*). Здесь, как и на рис. 1, *б*, цифрами обозначены линии поглощения соответствующих СК.

На рис. 3, *а* показан ^1H ЯМР спектр диспропорционированной канифоли (область ароматических и олефиновых протонов). Цифрами обозначены линии, принадлежащие протонам соответствующих кислот.

Анализ области поглощения ароматических протонов показывает, что наряду с дегидроабиетиновой кислотой в большом количестве присутствуют соединения с ароматическими протонами. Более наглядную картину демонстрирует ^{13}C ЯМР спектр (рис. 3, *б*) (область ароматических и олефиновых углеродов). В спектре присутствует много неидентифицированных линий, которые мы относим к линиям продуктов изомеризации дегидроабиетиновой кислоты.

Условия получения и физико-химические свойства фунгицидных добавок представлены в табл. 2. Остальные синтезы выполнены аналогично вышеописанному, они отличаются лишь введенным амином, его количеством и видом канифоли. Для проведения реакции на 1 моль смоляной кислоты, содержащейся в канифоли, брали 1 моль диамина.

Из данных табл. 2 видно, что химическое модифицирование канифоли диаминами приводит к значительному снижению кислотного числа и температуры размягчения ($T_р$) получаемых продуктов.

Для определения фунгицидной активности полученных продуктов, промышленного НФМ и имида ТМА [8, 11] была проведена экспресс-оценка способности вакуумного дистиллята ВД-2 с растворенными в нем фунгицидными добавками противостоять поражению канатной пряжи плесневыми грибами [12]. ВД-2 используется для приготовления пропиточных составов, применяемых для пропитки органических сердечников стальных канатов. Испытуемые образцы размером 30×20×2 мм изготавливали из пеньковой веревки, на 1 мин помещали в расплавы ВД-2 с 20% антисептических добавок, а затем уплощали и выравнивали.

Фунгитоксичность образцов по отношению к плесневым грибам оценивали методом «агаровой сетки» питательной среды Чапека – Докса, инокулированной спорами гриба *Aspergillus niger*, отличающегося повышенной устойчивостью к действию антисептиков. Чашки инкубировали при температуре 28°С в течение 8 сут, ячейки агаровой сетки ежедневно переносили на предметные стекла и микроскопировали в проходящем свете. Критерием фунгитоксичности служила лаг-фаза, т. е. время от постановки опыта до начала прорастания спор.

Если лаг-фаза у образцов составляла более 8 сут, то считалось, что образцы на фунгитоксичность выдержали испытания [12].

В табл. 3 приведены данные исследования влияния различных концентраций разрабатываемых фунгицидных добавок в ВД-2 на прорастание спор *A. niger* на образцах канатной пряжи в сравнение с НФМ.

Как видно из данных табл. 3, наиболее эффективными фунгицидными добавками при содержании их в ВД-2 при концентрации 12,5% и подавляющими рост спор гриба *A. niger* на образцах канатной пряжи являются образцы канифоли (СЖК и ДЖК), полученные химическим модифицированием ДЭТА и ГМДА. Фунгицидная активность НФМ проявляется при содержании его в количестве 15% и более в ВД-2. При любой из рассматриваемых концентраций в ВД-2 имид ТМА не эффективен.

На основе модифицированных канифолей были приготовлены пропиточные составы, рецептуры которых приведены в табл. 4. Содержание фунгицидной добавки варьировали от 15 до 20 мас. %.

При изготовлении составов 1–15, 1–20, 2–15, 2–20, 3–15, 3–20, 4–15, 4–20, 5–15, 5–20, 6–15, 6–20 не наблюдалось расслоение, что свидетельствует об отличном совмещении фунгицидных добавок на основе канифоли с нефтепродуктами.

При исследовании фунгицидной активности в качестве контрольных образцов были использованы пропиточные составы 7–15 и 7–20, содержащие промышленный НФМ от 15 до 20 мас. %.

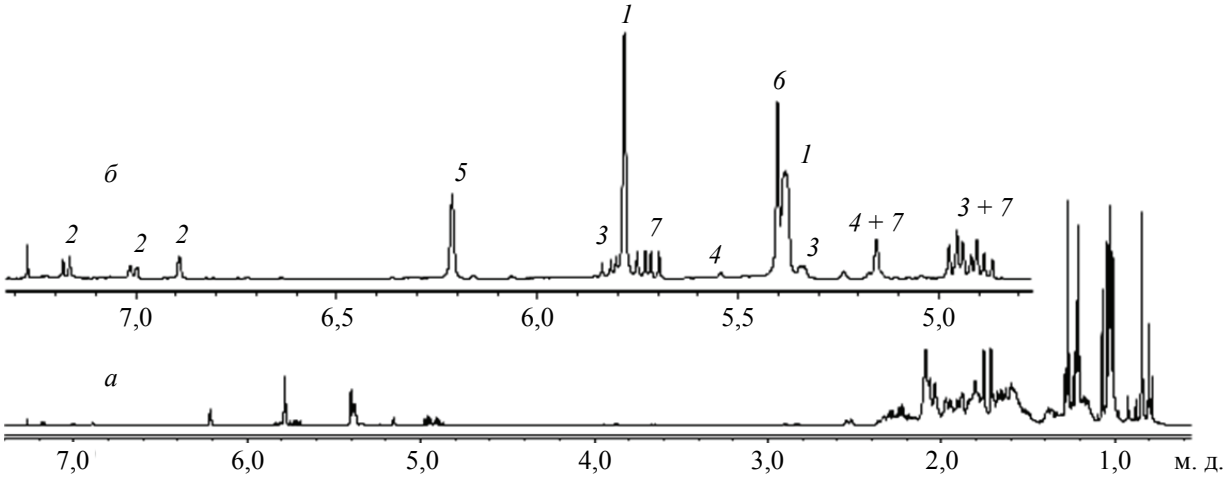


Рис. 1. ^{1}H ЯМР спектр раствора сосновой живичной канифоли в $CDCl_3$:
а – полный спектр; *б* – область ароматических и олефиновых протонов

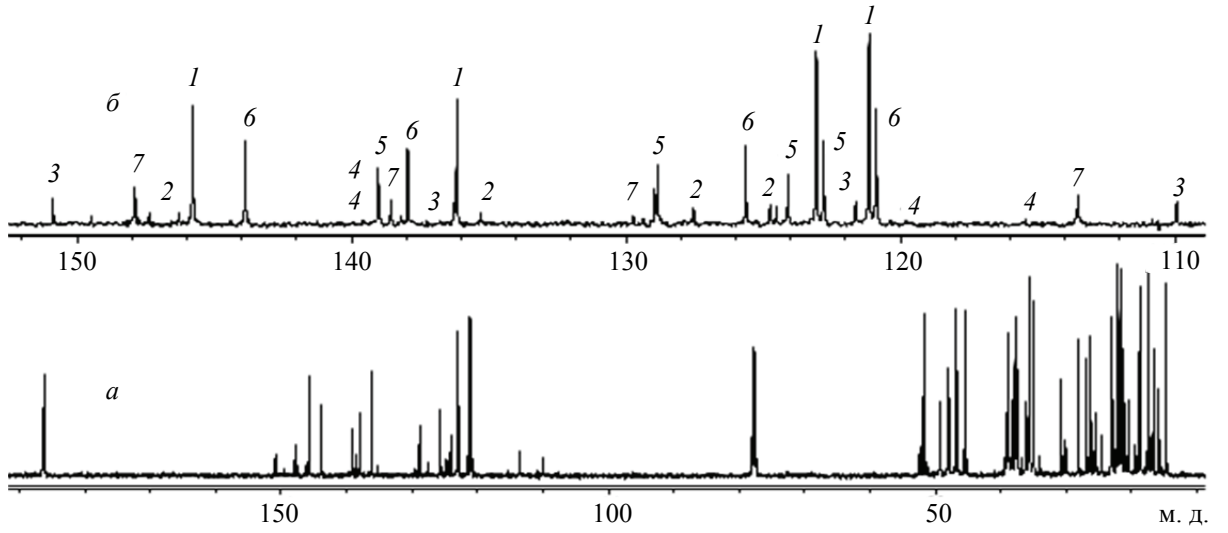


Рис. 2. ^{13}C ЯМР спектр раствора сосновой живичной канифоли в $CDCl_3$:
а – полный спектр; *б* – область ароматических и олефиновых углеродов

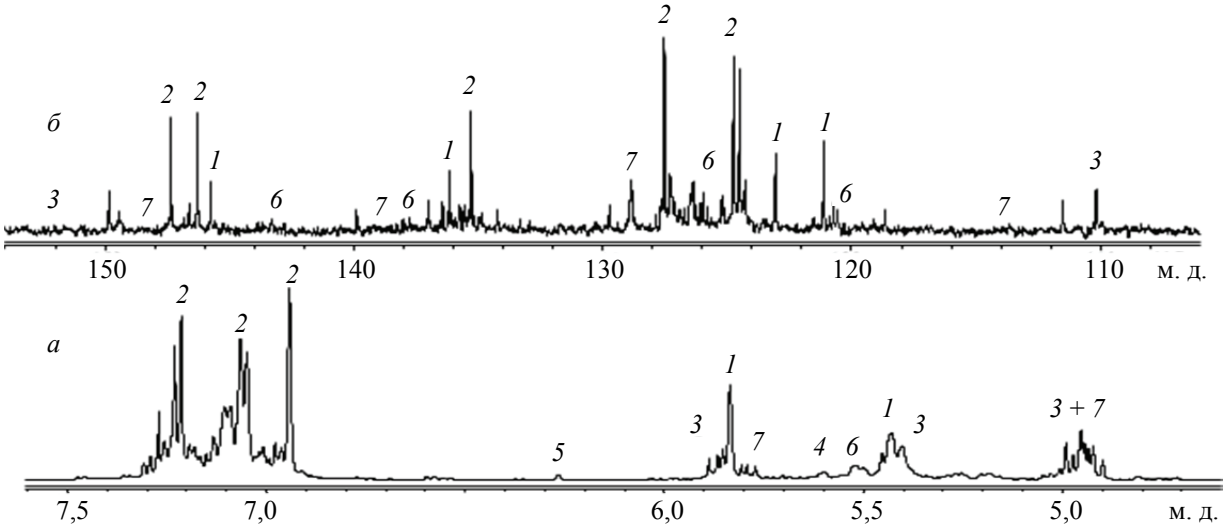


Рис. 3. ЯМР спектр раствора диспропорционированной канифоли в $CDCl_3$
(область ароматических и олефиновых сигналов):
а – ^{1}H; *б* – ^{13}C

Образцы канатной пряжи размером 30×20×2 мм изготавливали из пеньковой веревки, на 1 мин помещали в расплав пропиточного состава ($T_р$ = = (80 ± 5)°С) с биоцидными добавками, затем охлаждали, формировали компактные плоские пластинки с выровненной поверхностью и высушивали при комнатной температуре.

Грибостойкость пропитанных образцов пряжи оценивали в соответствии с ГОСТ 9.048 [12] методом 4 по степени развития плесневых грибов в условиях, имитирующих минеральное и органическое загрязнение. Из приведенных в табл. 4 данных видно, что обработка канифоли диаминами предлагаемым способом дает возможность получить фунгицидные добавки, по своей эффективности значительно превышающие НФМ. При этом полное ингибирование роста плесневых грибов обеспечивают составы: 1–20, 2–20, 3–20, 4–20, 5–20, 6–15, 6–20. Наиболее же эффективны составы 3–15, 3–20, 6–15, 6–20 (0 баллов), содержащие канифоли, обработанные гексаметилендиамином.

Таким образом, как видно из данных табл. 3, 4, химическое модифицирование канифоли диаминами дает возможность получить на ее основе фунгицидные добавки. Однако наиболее технологически приемлемым модификатором является диэтилентриамин, так как он не требует дополнительной стадии плавления, как гексаметилендиамин ($T_{пл}$ = 42°С), и не имеет низкой температуры кипения, как этилендиамин ($T_{кип}$ = 116,5°С), удобен при работе и более безопасен в применении.

Таблица 1

Состав канифолей, %

Компонент, %	СЖК	ДЖК
Абиетиновая кислота (1)	34,5	3,2
Дегидроабиетиновая кислота (2)	3,1	79,8
Изопимаровая кислота (3)	5,4	5,3
Левопимаровая кислота (4)	1,4	0,5
Неоабиетиновая кислота (5)	16,2	0,1
Палюстровая кислота (6)	24,1	2,1
Пимаровая кислота (7)	9,2	4,3

Таблица 2

Получение и физико-химические свойства фунгицидных добавок

Номер образца	Состав реакционной смеси, мас. %				Условия реакции		Физико-химические свойства	
	СЖК	ЭДА	ДЭТА	ГМДА	Т, °С	τ, ч	$T_{разм}$, °С	КЧ, мг КОН/ г
Сосновая живичная канифоль							73,0	172,0
1	100	20	–	–	190 ± 5	3	65,0	70,0
2	100	–	30	–	190 ± 5	6	51,0	52,4
3	100	–	–	30	190 ± 5	6	45,0	67,0
Диспропорционированная живичная канифоль							62,0	162,0
4	100	20	–	–	190 ± 5	3	58,5	68,89
5	100	–	30	–	190 ± 5	6	40,0	40,29
6	100	–	–	30	190 ± 5	6	38,4	66,0

Таблица 3

Лаг-фаза гриба *A. niger* на агаровой сетке, нанесенной на образцы канатной пряжи, обработанных смазкой ВД-2 с фунгицидными добавками

Образцы	Концентрация добавки в смазке ВД-2, %				
	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
1	1	2	>5	>6	>7
2	2	>10	>10	>10	>10
3	>10	>10	>10	>10	>10
4	1	2	>5	>7	>7
5	2	>10	>10	>10	>10
6	>10	>10	>10	>10	>10
7*	1	3	>10	>10	>10
8**	<1	<1	<1	<1	<1

* Нафтенат меди.

** Имид ТМА (ТМА, химически модифицированный 30 мас. % этаноламина).

Таблица 4

Рецептуры пропиточных составов и оценка фунгитоксичности образцов пряжи, обработанных пропиточными составами, содержащими фунгицидные добавки по ГОСТ 9.048

Номер рецептуры	Вакуумный дистиллят, ВД-2, мас. %	Петролатум, мас. %	Пластификатор, мас. %	Фунгицидная добавка, мас. %	Обрастание образцов, баллы	
					15 сут	15 сут
1–15	55	12	18	15	1	2
1–20	50	12	18	20	0	0
2–15	55	12	18	15	0	1
2–20	50	12	18	20	0	0
3–15	55	12	18	15	0	0
3–20	50	12	18	20	0	0
4–15	55	12	18	15	1	1–2
4–20	50	12	18	20	0	0
5–15	55	12	18	15	0	1
5–20	50	12	18	20	0	0
6–15	55	12	18	15	0	0
6–20	50	12	18	20	0	0
7–15*	55	12	18	15	0	1
7–20*	50	12	18	20	0	0
8–15**	55	12	18	15	3	4–5
8–20**	50	12	18	20	2	3
Контроль: пряжа без обработки					5	5

* В рецептуре использован нафтенат меди.

** В рецептуре использован имид ТМА.

Далее на основе канифолей (СЖК и ДЖК), химически модифицированных ДЭТА, были приготовлены пропиточные составы для защиты древесины, рецептуры которых приведены в табл. 5. Содержание фунгицидных добавок варьировали от 20 до 30 мас. %. В качестве пленкообразующих компонентов использовались битум или алкилфенолформальдегидная смола, а в качестве растворителя – скипидар или ксилол.

Биозащитные свойства составов по отношению к плесневым и деревоокрашивающим грибам испытывали в соответствии с ГОСТ 30028.4–2006 «Средства защитные для древесины, экспресс-метод оценки эффективности против деревоокрашивающих и плесневых грибов» [13]. Образцы древесины заболони сосны размером 10×55×75 мм с покрытием испытывали в 5 повторностях на трех группах грибов. По окончании испытаний определяли стадию развития грибов по 5-бальной шкале и с учетом характеристик, обозначенных в ГОСТ 30028.4–2006.

Грибостойкость пропитанных образцов древесины по отношению к дереворазрушающим грибам оценивали по ГОСТ 16712–95 [14]. Критерием оценки биостойкости служила средняя потеря массы 6 пропитанных и 6 контрольных образцов после воздействия домового гриба. Результаты испытаний представлены в табл. 5. Как видно из данных табл. 5, составы 9–25, 9–30, 10–25, 10–30 полностью подавляют рост плесневых и деревоокрашивающих грибов.

При испытании пропитанных образцов древесины на токсичность по отношению к дереворазрушающим грибам, согласно ГОСТ 16712–95, большинство вариантов (9–25, 9–30, 10–25, 10–30) обеспечивало высокую грибостойкость (снижение массы образцов не превышало величины допустимых операционных потерь 5%).

Как видно из данных табл. 5, оптимальное соотношение в пропиточных составах модифицированной канифоли составляет 25–30 мас. %.

На ЯМР спектрометре AVANCE-500 были записаны спектры ^{1}H и ^{13}C 10%-ных растворов в $CDCl_3$ сосновой живичной и диспропорционированной канифолей, обработанных эквимолярным количеством диэтилентриамина. Химические сдвиги сигналов протонов соединений определяли по сигналу хлороформа, а химические сдвиги ^{13}C измеряли относительно сигнала растворителя.

Как показали проведенные исследования, в анализируемых композициях отсутствуют индивидуальные смоляные кислоты канифолей, так как химические сдвиги компонентов отличны от химических сдвигов самих кислот. Аналогичное можно утверждать и о химических сдвигах ядер диэтилентриамина.

Таблица 5

Рецептуры пропиточных составов и результаты испытаний пропитанных образцов древесины на устойчивость к воздействию плесневых, деревоокрашивающих[I] грибов (согласно ГОСТ 30028.4–2006) и дереворазрушающих[II] грибов (согласно ГОСТ 16712–95)

Номер рецептуры	Фунгицидная добавка, мас. %	Пленкообразующий компонент (битум или алкилфенолформальдегидная смола), мас. %	Растворитель, мас. %	Грибостойкость[I]		Потеря массы[II], мас. %
				Площадь поражения, %	Стадия развития грибов, баллы	
9–20*	20	30	50	10	1	3,1
9–25*	25	25	50	0	0	2,8
9–30*	30	20	50	0	0	2,0
10–20**	20	30	50	15	2	3,6
10–25**	25	25	50	0	0	2,5
10–30**	30	20	50	0	0	1,8
Контроль				100	5	48,1

* В рецептуре использована в качестве фунгицидной добавки СЖК, модифицированная ДЭТА.

** В рецептуре использована в качестве фунгицидной добавки ДЖК, модифицированная ДЭТА.

Установлено, что количественное соотношение компонентов канифолей сохраняется в композициях. Кроме образующихся амидов смоляных кислот, компоненты активно ассоциируют, давая сложную реакционную смесь, имеющую химические сдвиги групп ядер, отличающиеся от химических сдвигов исходных смоляных кислот.

Для более детального анализа требуются дополнительные исследования. Таким образом, на основании проведенных исследований [15, 16] разработаны фунгицидные добавки [17, 18] для использования их в пропиточных составах для защиты канатной пряжи и древесины.

Заключение. Разработаны способы получения антисептиков для защиты канатной пряжи и древесины методом химического модифицирования канифоли диаминами. Установлено, что эффективными модификаторами канифоли являются диэтилентриамин и гексаметилендиамин. Полученные антисептики обладают более высокой фунгицидной активностью (подавляют рост плесневых, деревоокрашивающих и дереворазрушающих грибов) по сравнению с промышленным нафтенатом меди и могут быть рекомендованы для промышленного внедрения. Имиды ТМА не обладают фунгицидной активностью.

Список литературы

1. Головко А. И. Домовые грибы и меры борьбы с ними. М.: Наука, 1981. 72 с.

2. Богаров Б. В., Прокофьев А. К. Биоповреждения и защита материалов биоцидами. М.: Наука, 1988. С. 20–27.

3. Зандерман В. Природные смолы, скипидары, талловое масло. М.: Лесная пром-сть, 1964. 576 с.

4. Способ получения N-(оксиэтил)имида малеопимаровой кислоты: описание изобретения к а. с. 481597 СССР. № 1964037/23-4; заявл. 05.10.73; опубл. 25.08.75. Бюл. № 31. 1 с.

5. Состав для пропитки древесины: описание изобретения к а. с. 537814 СССР. № 2144670/15; заявл. 16.06.75; опубл. 05.12.76. Бюл. № 45. 2 с.

6. Wood treatment: pat. 3617314 US, № 746738; заявл. 23.07.68; опубл. 02.11.72. US Cl. 106/2. 5 с.

7. Пурши А. М. Микробная коррозия элементов кабелей связи // Докл. 3-й Всесоюз. конф. по биоповреждениям (г. Москва, 19–21 окт. 1987 г.): в 4 т. М., 1987. Т. 1. С. 177–178.

8. Способ получения антимикробной и антикоррозионной добавки для пропитки кабелей: пат. 1807051 СССР. № 4685332/04; заявл. 25.04.89; опубл. 07.04.93. Бюл. № 13. 4 с.

9. Определение методом ЯМР состава бальзамов из живицы сосны обыкновенной / Е. Д. Скаковский [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. 2008. Т. 75, № 3. С. 411–415.

10. Анализ состава живицы сосны обыкновенной методом ЯМР / Е. Д. Скаковский [и др.] // Вестник международной общественной академии экологической безопасности и природопользования. 2008. Вып. 4 (11). С. 40–43.

11. Вершук В. И., Гурич Н. А. Методы анализа сырья и продуктов канифольно-скипидарного производства. М.: Гослесбумиздат, 1960. 194 с.

12. Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов: ГОСТ 9.048–89. ЕСЗК. М.: Изд-во стандартов, 1989. 15 с.

13. Средства защитные для древесины, экспресс-метод оценки эффективности против дереворазрушающих и плесневых грибов: ГОСТ 30028.4–2006. М.: Стандартинформ, 2007. 9 с.

14. Средства защитные для древесины. Методы испытания токсичности: ГОСТ 16712–95. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1995. 12 с.

15. Разработка рецептуры и технологии получения смазки для пропитки органических сердечников стальных канатов с применением нафтената меди и его аналогов: отчет о НИР (заключ.) / Институт химии новых материалов НАН Беларуси. Минск, 2006. № ГР 20052232. 54 с.

16. Разработка рецептуры и технологии получения антисептического состава для защиты древесины на основе лесохимического и растительного сырья: отчет о НИР (заключ.) / Институт химии новых материалов НАН Беларуси. Минск, 2007. № ГР 2006899. 56 с.

17. Способ получения фунгицидной добавки: пат. 15028 Респ. Беларусь. № a20091174; заявл. 31.07.09; опубл. 30.04.11. Бюл. № 5. 5 с.

18. Фунгицидный состав для пропитки древесины: пат. 16154 Респ. Беларусь. № a20091175; заявл. 31.07.09; опубл. 30.08.12. Бюл. № 4. 5 с.

References

1. Golovko A. I. *Domovye griby i mery bor'by s nimi* [House mushrooms and control measures]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 72 p.

2. Bogarov B. V., Prokof'ev A. K. *Biopovrezhdeniya i zashchita materialov biotsidami* [Biodeterioration and biocide protection]. Moscow, Nauka Publ., 1988, pp. 20–27.

3. Zanderman V. *Prirodnye smoly, skipidary, tallovoe maslo* [Natural resins, turpentine, tall oil]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1964. 576 p.

4. Kalnins A. Ya. *Sposob poluchenija N-(oksietil)imida maleopimarovoy kisloty* [The method of obtaining N-(hydroxyethyl) imide maleopimaric acid]. Description of the invention for author's sitting USSR, no. 481597, 1975.

5. Strunov M. V. *Sostav dlya propitki drevesiny* [Composition for wood impregnation]. Description of the invention for author's sitting USSR, no. 537814, 1976.

6. Willis N. E. Wood treatment. Pat. US, no. 3617314, 1972.

7. Purshi A. M. Microbial corrosion of communication cable elements. *Dokl. 3-y Vsesoyuz. konf. po biopovrrezhdeeniyam* [3rd All-Union conf. on biodeterioration]: in 4 vol. Moscow, 1987, vol. 1, pp. 177–178 (In Russian).

8. Shlyashinsky R. G. *Sposob polucheniya antimikrobnoy i antikorrozionnoy dobavki dlya propitki kabeley* [The method of obtaining antimicrobial and anticorrosive additives for cable impregnation]. Patent USSR, no. 1807051, 1993.

9. Skakovskiy E. D. Determination by NMR of the composition of balm from the resin of pine ordinary. *Zhurnal prikladnoy spektroskopii* [Journal of applied spectroscopy], 2008, vol. 75, no. 3, pp. 411–415 (In Russian).

10. Skakovskiy E. D. An analysis of the composition of common resin of pine ordinary by NMR. *Vestnik mezhdunarodnoy obshhestvennoy akademii ekologicheskoy bezopasnosti i prirodopol'zovaniya* [Bulletin of the international public academy of environmental safety and environmental management], 2008, issue 4 (11), pp. 40–43 (In Russian).

11. Vershuk V. I., Gurich N. A. *Metody analiza syr'ya i produktov kanifol'no-skipidarnogo proizvodstva* [Methods of analysis of raw materials and products of rosin-turpentine production]. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1960. 194 p.

12. GOST 9.048–89. Technical products. Methods of laboratory tests for resistance to mold fungi. Moscow, Publishing House of Standards, 1989. 15 p. (In Russian).

13. GOST 30028.4–2006. Protective means for wood, an express method of evaluating the effectiveness against wood-coloring and mold fungi. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 9 p. (In Russian).

14. GOST 16712–95. Protective means for wood. Toxicity testing methods. Minsk, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification Publ., 1995. 12 p. (In Russian).

15. *Razrabotka receptury i tehnologii polucheniya smazki dlya propitki organicheskikh serdechnikov stal'nykh kanatov s primeneniem naftenata medi i ego analogov* [Development of a formulation and technology for producing a lubricant for the impregnation of organic cores of steel ropes using copper naphthenate and its analogues], research report (conclusion), Institute of Chemistry of New Materials of the NAS of Belarus. Minsk, 2006, no. SR 20052232. 54 p. (In Russian).

16. *Razrabotka retseptury i tekhnologii polucheniya antisepticheskogo sostava dlya zashhity drevesiny na osnove lesohimicheskogo i rastitel'nogo syr'ya* [Development of a formulation and technology for producing

an antiseptic composition for protecting wood based on forest chemical and plant materials], research report (conclusion), Institute of Chemistry of New Materials of the NAS of Belarus. Minsk, 2007, no. SR 2006899. 56 p. (In Russian).

17. Klyuyev A. Yu. *Sposob polucheniya fungitsidnoy dobavki* [A method of obtaining a fungicidal additive]. Patent RB, no. 15028, 2011.

18. Klyuyev A. Yu. *Fungitsidnyy sostav dlya propitki drevesiny* [Fungicidal composition for wood impregnation]. Patent RB, no. 16154, 2012.

Информация об авторах

Бовтрель Альбина Юрьевна – аспирант кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: antonik.alya@mail.ru

Божелко Игорь Константинович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: bikbstu@mail.ru

Клюев Андрей Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь).

Скаковский Евгений Доминикович – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник. Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси (220072, г. Минск, ул. Сурганова, 13, Республики Беларусь). E-mail: sed@ifoch.bas-net.by

Дубоделова Екатерина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: katedubodelova@tut.by

Information about the authors

Bovtrel' A'bina Yur'yevna – PhD student, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: antonik.alya@mail.ru

Bozhelko Igor' Konstantinovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bikbstu@mail.ru

Klyuyev Andrey Yur'yevich – DSc (Engineering), Professor of the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (220006, Minsk, Sverdlova str., 13a, Republic of Belarus).

Skakovskiy Yevgeniy Dominikovich – PhD (Chemistry), Leading Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganova str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sed@ifoch.bas-net.by

Dubodelova Yekaterina Vladimirovna – PhD (Engineering), Associate Professor, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (220006, Minsk, Sverdlova str., 13a, Republic of Belarus). Email: katedubodelova@tut.by

Поступила 18.02.2020

ОБЩЕИНЖЕНЕРНЫЕ ВОПРОСЫ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

УДК 662.71:620.95

Н. О. Азовская, В. В. Перетрухин, Г. А. Чернушевич
Белорусский государственный технологический университет

ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ В МАЛОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ БЕЛАРУСИ

В статье рассмотрены вопросы обеспечения энергетической безопасности Республики Беларусь и возникающие при этом проблемы использования древесных ресурсов из лесхозов, подвергшихся радиоактивному загрязнению, для получения электроэнергии и тепла.

Прежде всего, древесина – это единственный вид топлива, естественно возобновляющийся в больших объемах, в то время как запасы горючих ископаемых ограничены. Затраты труда на добычу ископаемых видов топлива с течением времени увеличиваются, а трудоемкость заготовки и вывозки древесины уменьшается. Немаловажное значение имеет и экологический аспект проблемы – древесное топливо практически не содержит серы и имеет низкую реакционную способность дымовых газов, так как в них при сжигании древесины не содержится сернистого и серного газа, а содержание окиси углерода в современных энергоустановках ТЭС минимально.

В настоящее время в Республике Беларусь и за рубежом интерес к вопросам энергетического использования древесной биомассы возрастает. Потребителей прежде всего интересуют вопросы использования в качестве топлива древесных отходов, которые не находят технологического применения по различным причинам. Они являются вторичными топливными энергетическими ресурсами и выступают источником реальной экономии горючих ископаемых. Энергетическое использование древесных отходов, непригодных для технологического применения, способствует выполнению задачи по обеспечению энергонезависимости страны и улучшению использования лесосырьевых ресурсов.

Ключевые слова: топливная древесина, древесные отходы, радиоактивное загрязнение.

N. O. Azovskaya, V. V. Peretrukhin, G. A. Chernushevich
Belarusian State Technological University

PROBLEMS OF USING WOODEN WASTE IN BELARUS'S SMALL POWER ENGINEERING

The article considers the issues of ensuring the energy security of the Republic of Belarus and the problems arising from the use of wood resources from forest departments exposed to radioactive contamination to generate electricity and heat.

First of all, wood is the only type of fuel that naturally renews in large volumes, while the reserves of fossil fuels are limited. Labor costs for the extraction of fossil fuels increase over time, and the complexity of harvesting and transporting wood decreases. The environmental aspect of the problem is also of no small importance − wood fuel contains virtually no sulfur and has low reactivity of flue gases, since they do not contain sulfur and sulfur gas when burning wood and the carbon monoxide content in modern TPP power plants is minimal.

Currently, in the Republic of Belarus and abroad, interest in the energy use of wood biomass is increasing. Consumers are primarily interested in the issues of using wood waste for fuel, which do not find technological application for various reasons. They are secondary fuel energy resources and are a source of real fuel economy. The energy use of wood waste unsuitable for technological use contributes to the task of ensuring the country's energy independence and improving the use of forest resources.

Key words: fuel wood, wood waste, radioactive pollution.

Введение. В настоящее время общая площадь лесного фонда Республики Беларусь составляет 9,8 млн. га, из них в зонах радиоактивного загрязнения находится около 1,59 млн. га (16,6%). Уменьшение площадей радиоактивного загрязнения лесного фонда республики и снижение активности древесины происходит за счет естественного радиоактивного распада [1].

Общий запас древесины на корню оценивается в 1,7 млрд. м^3, а ежегодный средний прирост составляет 32 млн. м^3. В хозяйственный оборот ежегодно вовлекается большой объем древесных ресурсов, так в 2018 г. площадь рубок леса составила 499,1 тыс. га и было заготовлено 28,6 млн. кубометров ликвидной древесины [2].

В настоящее время в Беларуси действует более 3,3 тыс. источников энергии на местных топливно-энергетических ресурсах (ТЭР) суммарной электрической мощностью более 130 МВт и тепловой мощностью более 6800 МВт, в том числе более 20 мини-ТЭЦ (суммарной электрической мощностью 130 МВт и тепловой мощностью – около 350 МВт.

Для нашей страны, импортирующей около 80–85 процентов всех ТЭР, задача по максимальному вовлечению в топливно-энергетический баланс местных видов ТЭР и возобновляемых источников энергии (ВИЭ) является первостепенной.

Широкое использование в республике местных ТЭР и ВИЭ позволит повысить энергетическую безопасность государства, способствует развитию собственных технологий и производству соответствующего оборудования. Кроме того, использование местных ТЭР, как правило, является экологически безопасным.

Основная часть. В соответствии с Программой энергосбережения Беларуси стратегической целью является увеличение до 30% доли местных видов топлива. Ежегодно лесхозы республики для нужд тепловой энергетики заготавливают 4,5 млн. т древесного топлива.

Исходя из данных о ресурсном потенциале местных и возобновляемых источников энергии и экономически целесообразном объеме их использования, можно прогнозировать увеличение этого показателя в 2020 г. до 5 млн. т. у. т. Рост доли местных видов топливно-энергетических ресурсов в балансе котельно-печного топлива позволит уменьшить объемы импорта энергоносителей, а также придать дополнительный импульс развитию перспективных направлений в области энергетики. В результате не только сократится энергозависимость, но и за счет сохранения финансовых ресурсов внутри страны будет достигнут дополнительный экономический эффект (увеличение рабочих мест, создание новых высокотехнологичных производств, рост налогооблагаемой базы и другое).

Национальная программа разработана в целях комплексного решения названной проблемы. Ожидается, что к 2020 г. в эксплуатацию будет введено 138 источников энергии на местных видах топлива. Годовой объем потребления топливной древесины одной мини-ТЭЦ Беларуси в зависимости от мощности колеблется от 40 до 60 тыс. м^3 [3].

В рамках реализуемых в республике программ и планов мероприятий решаются задачи по использованию древесного топлива для производства тепловой и электрической энергии, повышению энергоэффективности экономики страны и снижению доли импортируемых энергоресурсов. Характерным для развитых стран является высокая степень использования в качестве топлива древесных отходов. Это связано с тем, что рост цен на традиционные виды топлива (мазут, уголь и дизельное топливо), а также ужесточение контроля над утилизацией отходов и стремление перерабатывающих производств снизить свои затраты стали основными факторами заметного увеличения в последнее время интереса к средним и малым автономным источникам электрической энергии. Кроме этого дополнительный интерес обусловливается тем фактом, что в качестве топлива данные автономные источники электроэнергии применяют отходы биомассы, и в частности, так называемые возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

Использование в качестве источников энергии ВИЭ обеспечивает значительное сокращение количества выбросов в атмосферу парниковых газов, и тем самым создает необходимые предпосылки для осуществления торговли квотами на выбросы в атмосферу вредных веществ в рамках механизма реализации Киотского протокола.

Затраты труда на заготовку и вывозку древесины выше затрат труда на добычу ископаемых видов топлива, а транспортабельность древесного топлива существенно ниже транспортабельности каменных углей и жидкого топлива. Это способствовало снижению значимости использования древесного топлива в экономике страны. В связи с незначительным удельным весом древесины в энергетическом балансе промышленно развитых стран казалось, что интерес к энергетическому использованию древесного топлива утрачен навсегда. Однако энергетический кризис, развившийся в 2008 г., заставил изменить точку зрения на перспективы энергетического использования древесины.

Древесина − это единственный вид топлива, естественно возобновляющийся в больших объемах, в то время как запасы горючих ископаемых ограничены. Затраты труда на добычу ископаемых видов топлива с течением времени увеличиваются, в то время как трудоемкость заготовки древесины уменьшается. Важное значение имеет и экологический аспект проблемы – древесное топливо практически не содержит серы, поэтому в дымовых газах при сжигании древесины не содержится сернистого и серного

газа, а содержание окиси углерода в современных энергоустановках ТЭС минимально [4].

Вовлечение в топливный баланс древесных отходов может полностью удовлетворить потребность в топливе лесной отрасли.

Основными источниками образования отходов являются различные лесопромышленные комплексы и деревоперерабатывающие предприятия. Древесные отходы образуются в большом количестве практически на всех стадиях технологического процесса: лесозаготовки, лесопиления и деревообработки.

Согласно СТБ 1867-2017 «Отходы древесные. Общие технические условия» к отходам лесозаготовки относятся обрезки хлыстов, вершины, сучья, ветви, пни, корни, кора [5].

Образующиеся древесные отходы можно классифицировать:

– по сортименту исходного сырья (отходы пиломатериалов, отходы фанеры и древесноволокнистых плит, отходы древесностружечных плит);

– породам древесины (хвойная, лиственная);

– влажности (сухие – до 15%, полусухие – 16–30%, влажные – 31% и выше.

В своем естественном виде отходы лесозаготовок малотранспортабельны, при использовании в качестве топлива они предварительно измельчаются в щепу.

К отходам лесопиления и деревообработки относятся: горбыль, отрезки пиломатериалов, карандаш, обрезки шпона, стружка, древесные опилки, кора.

Количество отходов деревообрабатывающих производств зависит от качества поставляемого сырья, типа и размера изготовляемой продукции, технической оснащенности предприятия и его мощности и составляет 45–63% исходного сырья (пиломатериалов, фанеры).

К отходам, объем которых зависит от используемого для раскроя оборудования, относят опилки. Объем древесины, переходящей в опилки, зависит от толщины пил: чем тоньше пила, тем меньше опилок.

К отходам, обусловленным качеством исходного сырья, относятся горбыли, торцовые срезки, рейки, разнообразные вырезки с пороками и дефектами. При использовании древесного топлива возникает ряд проблем, связанных с радиационной безопасностью:

– для устойчивой работы промышленных котельных и мини-ТЭЦ необходимо создавать запасы топлива, а их складирование приводит к повышению радиационного фона;

– при сгорании загрязненной топливной древесины может образовываться зола с повышенным содержанием радионуклидов, а это исключает ее использование в качестве минерального удобрения в сельском и лесном хозяйстве;

– загрязнение окружающей среды газообразными и мелкодисперсными продуктами сгорания древесного топлива [6].

Складирование больших объемов древесины, древесного топлива, содержащего радионуклиды даже в пределах допустимых норм (РДУ/ЛХ-2001), будет приводить к локальному повышению естественного радиационного фона (ЕРФ), норма – 0,1–0,2 мкЗв/ч (10–20 мкР/ч).

Для контроля радиационного фона и измерения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения внешнего облучения в диапазоне 0,1 мкЗв/ч до 10 мЗв/ч применяется дозиметр-радиометр МКС-АТ6130.

Проведенные исследования на ОАО «Борисовдрев» показывают, что в железнодорожном вагоне с объемом древесины 50 м^3 (удельный вес сосны 820 кг/м^3, вес партии составит 41 000 кг) и при удельной активности 100 Бк/кг активность всей партии составит 4,3 МБк. Тогда мощность эквивалентной дозы, измеренная с помощью дозиметра МКС-АТ6130 непосредственно у вагона с древесиной и такой активностью, может быть в 1,5–1,7 раза больше естественного радиационного фона [7].

Рис. 1. МКС-АТ6130:
1 – мембранная панель управления;
2 – жидкокристаллический индикатор (ЖКИ);
3 – светодиодный индикатор

Необходимость снижения активности древесного сырья, используемого как местное топливо на крупных энергоустановках, обусловлено вероятностью загрязнения окружающей среды зольными остатками с высокими концентрациями радионуклидов. В 2010 г. Национальной академией наук Беларуси были разработаны и предложены для практического применения допустимые уровни содержания цезия-137 до 200 Бк/кг в древесном топливе (дровах и древесных отходах для изготовления топлива), используемом в промышленных котельных и мини-ТЭЦ тепловой производительностью 0,1 МВт и более. Это позволит обеспечить безопасное обращение с зольными отходами.

При использовании древесного топлива с содержанием радиоцезия-137 до 200 Бк/кг образуется зола с активностью меньшей, чем радиоактивные отходы (РАО, 10 000 Бк/кг).

При сгорании древесной биомассы образуется от 1 до 8% золы. Зольность зависит от состава древесной биомассы. Максимальное количество золы образуется при сгорании коры и минимальное количество – при сгорании стволовой древесины.

Однако в зависимости от типа технологического процесса заготовки древесины, зольность существенно изменяется из-за загрязнения ее внешними минеральными включениями. Загрязнение ветвей и сучьев в процессе заготовки, трелевки и вывозки наиболее интенсивно при влажной погоде весной и осенью.

Древесная зола является ценным комплексным фосфорно-калийным и известковым удобрением, так как в ней содержится до 7% фосфора, до 15% калия и до 40% кальция. Один килограмм золы заменяет 220 г гранулированного суперфосфата, 240 г хлористого калия и 500 г извести. И хотя в золе нет азота, она содержит 30 полезных микроэлементов, причем в концентрированном виде: магний, железо, кремний, сера, бор, марганец.

В отличие от промышленных удобрений, зола не содержит хлора, снижает кислотность почвы, повышает зимостойкость посадок, разлагает органику, делая ее более доступной для растений.

С учетом высокой опасности воздействия ионизирующих излучений на человека, для обеспечения радиационной безопасности работников лесного хозяйства и деревообрабатывающих предприятий важное место отводится строгому соблюдению основных принципов и норм радиационной безопасности:

– не превышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения;

– исключение всякого необоснованного облучения;

– поддержание на возможно низком уровне индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц [8].

Системная работа по снижению риска облучения работников при использовании древесных ресурсов из загрязненных радионуклидами лесхозов обеспечивается комплексом защитных мероприятий [9].

Радиационный мониторинг лесного фонда осуществляется на постоянных пунктах наблюдения (ППН), образующих первичную сеть радиационного мониторинга леса (РМЛ). Основной задачей РМЛ является изучение динамики и факторов, влияющих на накопление цезия-137 в контролируемых объектах [10, 11].

Организация и проведение радиационного мониторинга возлагается на специалистов службы радиационного контроля. Радиационное обследование лесосек проводится с плотностью загрязнения почв цезием-137 более 37 кБк/м^2 [12].

Для получения информации о радиационной обстановке на предприятии, в окружающей среде и об уровнях облучения работающих, необходимо проводить радиационный контроль [13].

Радиационный контроль древесного топлива, используемого в энергоустановках, проводят с целью обеспечения норм радиационной безопасности по содержанию цезия-137 допустимым уровням. Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов в древесине разработаны на основе установленной в республике допустимой среднегодовой дозы общего облучения для населения в 1 мЗв [14].

Для обеспечения радиационной безопасности необходимо измерять радиологические условия на рабочем месте следующих показателей: мощности дозы внешнего облучения, плотности потока бета-частиц и удельной активности [15].

Для измерения плотности потока бета-частиц применяется дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДПБ-01 (диапазон измерений – $1{-}5{\cdot}10^5$ част./см^2·мин).

Измерение удельной активности древесного топлива осуществляется гамма-радиометрами РУГ-91-2 (рис. 2), РКГ-АТ1320А, которые позволяют контролировать активность в диапазоне от 3,7 до 10^5 Бк/кг [16].

Для индивидуального дозиметрического контроля внутреннего облучения работников лесного хозяйства целесообразно использовать спектрометр излучения человека (СИЧ) СКГ-АТ1316.

Рис. 2. Общий вид гамма-радиометра РУГ-91-2

СИЧ позволяет проводить экспресс-конроль и измерение активности гамма-излучающих радионуклидов в теле человека, а также проводить оценку доз внутреннего облучения.

Заключение. Использование древесных отходов лесозаготовки, лесопиления и деревообработки на топливо есть завершающая фаза лесопромышленного производства, придающая ему безотходный характер и направленная на повышение эффективности мер по охране при-

роды. Вовлечение в топливный баланс лесопромышленными предприятиями древесных отходов – это наиболее эффективный способ сбережения горючих ископаемых для последующих поколений, запасы которых в природе уменьшаются все возрастающими темпами.

Для обеспечения радиационной безопасности работников лесного хозяйства и деревообрабатывающих предприятий все поступающее сырье, в том числе и древесное топливо, подвергается радиационному контролю.

Таким образом, использование местного древесного топлива может и должно быть эффективным, содействуя повышению энергетической безопасности страны, при комплексном научном подходе к данной проблеме.

Список литературы

1. Статистический ежегодник Республики Беларусь 2018. Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2018. 490 с.

2. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь. Статистический сборник. Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2019. 200 с.

3. Государственная программа «Энергосбережение» на 2016–2020 годы: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 28 марта 2016 г., № 248 // Совет Министров Республики Беларусь, НПА правительства. URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&po=C21600248 (дата обращения: 20.02.2020).

4. Перетрухин В. В., Чернушевич Г. А., Босак В. Н. Радиационный контроль древесного топлива для энергетических установок на примере ОАО «Ивацевичдрев» // Труды БГТУ. 2015. № 2 (175): Лесная и деревообрабатывающая промышленность. С. 202–205.

5. Отходы древесные. Общие технические условия: СТБ 1867-2017. Введ. 01.10.2017. Минск: БелГИСС, 2017. 12 с.

6. Перетрухин В. В., Чернушевич Г. А., Босак В. Н. Система защитных мероприятий по обеспечению радиационной безопасности в лесном комплексе Беларуси // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2017. № 2 (198). С. 316–321.

7. Перетрухин В. В., Чернушевич Г. А. Дозиметрическое и радиометрическое обеспечение радиационной безопасности на ОАО «Ивацевичдрев» // Труды БГТУ. 2014. № 2 (166): Лесная и деревообрабатывающая промышленность. С. 135–139.

8. Критерии оценки радиационного воздействия: гигиенический норматив от 28.12.2012 № 213. Введ. 01.01.2013. Минск: Министерство здравоохранения Республики Беларусь, 2012. 232 с.

9. Правила ведения лесного хозяйства в зонах радиоактивного загрязнения / Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь. Гомель: Институт радиологии, 2009. 52 с.

10. Радиационный мониторинг лесного фонда. Закладка постоянного пункта наблюдения, Порядок проведения: ТКП-498-2013. Введ. 03.10.2013. Минск: Беллесозащита, 2013. 28 с.

11. Радиационный контроль. Обследование лесосек. Порядок проведения: ТКП-239-2010. Введ. 22.02.2010. Минск: Беллесозащита, 2010. 20 с.

12. Радиационный мониторинг лесного фонда. Обследование постоянного пункта наблюдения. Порядок проведения: ТКП-499-2013. Введ. 03.10.2013. Минск: Беллесозащита, 2013. 28 с.

13. Радиационный контроль. Отбор и подготовка проб лесной продукции. Порядок проведения: ТКП-251-2010. Введ. 28.06.2010. Минск: Беллесозащита, 2010. 24 с.

14. Радиационный контроль. Обследование земель лесного фонда. Порядок проведения: ТКП-240-2010. Введ. 01.06.2010. Минск: Беллесозащита, 2010. 24 с.

15. Радиационный контроль. Объекты лесного хозяйства, рабочие места. Порядок проведения: ТКП-250-2010. Введ. 28.06.2010. Минск: Беллесозащита, 2010. 27 с.

16. Чернушевич Г. А., Перетрухин В. В. Радиационная безопасность. Лабораторный практикум: учеб. пособие для студентов по профилю образования «Техника и технологии». Минск: БГТУ, 2018. 198 с.

References

1. *Statisticheskiy ezhegodnik Respubliki Belarus' 2018* [Statistical yearbook of the Republic of Belarus 2018]. Minsk, Natsional'nyy statisticheskiy komitet Respubliki Belarus’, 2018. 490 p.

2. *Okhrana okruzhayushchey sredy v Respublike Belarus'. Statistichesky sbornik* [Environmental protection in the Republic of Belarus. Statistical Digest]. Minsk. Natsional'nyy statisticheskiy komitet Respubliki Belarus, 2019. 200 p.

3. *Gosudarstvennaya programma “Energosberezhenie” na 2016–2020 gody: postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus',* 28.03.2016, № 248 [State program “Energy saving” for 2016-2020: Resolution of the Republic of Belarus, 28.03.2016, no. 248]. Available at: https://pravo.by/document/?guid=3871&po=C21600248 (accessed 20.02.2020).

4. Peretrukhin V. V., Chernushevich G. A., Bosak V. N Radiation control of wood fuel for power plants (on the example of Ivatsevichdrev OJSC). *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 202−205 (In Russian).

5. STB 1867-2017. Wood waste. General specifications. Minsk, BelGISS Publ., 2017. 12 p. (In Russian).

6. Peretrukhin V. V., Chernushevich G. A., Bosak V. N. The system of protective measures to ensure radiation safety in the forest complex of Belarus. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2017. no. 2: Forestry, nature management and processing of renewable resources, pp. 316–321(In Russian).

7. Peretrukhin V. V., Chernushevich G. A. Dosimetric and radiometric assurance of radiation safety at Ivatsevichdrev OJSC. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014. no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 135−139 (In Russian).

8. Criteria for assessing radiation exposure: hygienic standard. Minsk, Ministerstvo zdravookhraneniya Respubliki Belarus' Publ., 2012. 232 p. (In Russian).

9. *Pravila vedeniya lesnogo khozyaystva na territoriyakh, podvergshikhsya radioaktivnomu zagryazneniyu v rezultate katastrofy na ChAES* [Rules of conducting forestry in the territories subjected to radioactive contamination as a result of the Chernobyl NPP disaster]. Gomel', In-t radiologii Publ., 2017. 48 p.

10. TKP-498-2013. Radiation monitoring of the forest fund. Bookmark the permanent observation point. Procedure for conducting. Minsk, Bellesozashchita Publ., 2013. 28 p. (In Russian).

11. TKP 239-2010. Radiation control. Survey of cutting areas. Procedure for conducting. Minsk, Bellesozashchita Publ., 2010. 20 p. (In Russian).

12. TKP-499-2013. Radiation monitoring of the forest fund. Survey of a permanent observation point. Procedure for conducting. Minsk, Bellesozashchita Publ., 2013. 28 p. (In Russian).

13. TKP 251-2010. Radiation control. Sampling and sample preparation of forest products. Procedure for conducting. Minsk, Bellesozashchita Publ., 2010. 24 p. (In Russian).

14. TKP 240-2010. Radiation control. Survey of forest land. Procedure for conducting. Minsk, Bellesozashchita Publ., 2010. 24 p. (In Russian).

15. TKP 250-2010. Radiation control. The objects of forestry jobs. Procedure for conducting. Minsk, Bellesozashchita Publ., 2010. 27 p. (In Russian).

16. Chernushevich G. A., Peretrukhin V. V. *Radiatsionnaya bezopasnost'. Laboratornyy praktikum: ucheb. posobie dlya studentov po profilyu obrazovaniya "Tekhnika i tekhnologii"* [Radiation safety. Laboratory workshop: textbook manual for students on the profile of education "Engineering and Technology"]. Minsk, BGTU Publ., 2018. 198 p.

Информация об авторах

Азовская Наталья Олеговна − кандидат сельскохозяйственных наук, преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: azovskaya_natasha@tut.by

Перетрухин Виктор Васильевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: viklar@yandex.ru

Чернушевич Григорий Алексеевич – старший преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: gregory1946@rambler.ru

Information about the authors

Azovskaya Natallia Olegovna – PhD (Agriculture), lecturer, the Department of Occupational Safety. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: azovskaya_natasha@tut.by

Peretrukhin Viktor Vasil'evich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Occupational Safety. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: viklar@yanbex.ru

Chernushevich Grigoriy Alekseevich – Senior Lecturer, the Department of Occupational Safety. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gregory1946@rambler.ru

Поступила 27.02.2020

УДК 613.6:674

И. Т. Ермак, А. К. Гармаза
Белорусский государственный технологический университет

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ АТТЕСТАЦИИ РАБОЧИХ МЕСТ ПО УСЛОВИЯМ ТРУДА ДЛЯ ОСНОВНЫХ ПРОФЕССИЙ НА РУБКАХ ЛЕСА

Проанализированы документы по аттестации рабочих мест отдельных лесхозов республики. Анализ результатов аттестации рабочих мест по условиям труда проводился для четырех основных профессий при выполнении лесосечных работ: вальщик леса; лесоруб (бензопилой); тракторист на подготовке лесосек, трелевке и вывозке леса; водитель автомобиля (вывозка леса). Исследовались условия труда рабочих указанных профессий Гомельского, Волковысского, Слонимского, Пуховичского, Осиповичского лесхозов Республики Беларусь.

Были проанализированы результаты фотографии рабочего времени, что позволило получить исходные данные о продолжительности действия факторов производственной среды, а также подтверждение (наличия или отсутствия) показателей тяжести и напряженности трудового процесса. Для профессий «вальщик леса» и «лесоруб» – это шум, вибрация (общая и локальная), нахождение в неудобной рабочей позе, работа на открытом воздухе; для профессий «тракторист на подготовке лесосек, трелевке и вывозке леса» и «водитель автомобиля» (вывозка леса) – это шум, вибрация (общая и локальная), длительность сосредоточенного внимания, фиксированная поза.

Данные аттестации рабочих мест по условиям труда позволили установить класс условий труда с учетом времени воздействия фактора для указанных профессий как «вредный», в пределах 3.3–3.4.

Анализ документов по аттестации показал, что в 83% случаев приведен расчет не всех показателей, характерных для таких рабочих мест, как вальщик и обрубщик сучьев.

Ключевые слова: аттестация, фотография рабочего времени, условия труда, шум, вибрация, микроклимат.

I. T. Yermak, A. K. Garmaza
Belarusian State Technological University

ANALYSIS OF JOB CERTIFICATIONS ON WORKING CONDITIONS OF PRIMARY PROFESSIONS IN FELLING INDUSTRY

Analyzed documents on certification of workplaces in selected forestry enterprises of the republic. Analysis of the results of certification of workplaces on working conditions was carried out for the four major professions in carrying out logging activities: feller; lumberjack (chainsaw); tractor operator for cutting area preparations, skidding and timber hauling; car driver (logs transportation). We investigated the working conditions of these professions in Gomel, Volkovysk, Slonim, Pukhovichi, Asipovichy forestry enterprises of Belarus.

We analyzed photos of work time protocol, which allowed us to obtain baseline data on the duration of the work environment, as well as an acknowledgment (presence or absence) of indicators of severity and intensity of the labor process. For professions “feller” and “lumberjack” these are noise, vibration (general and local), staying in an uncomfortable working posture, work in the open air; for professions “tractor operator for cutting area preparations, skidding and timber hauling” and “car driver (logs transportation)” there are the noise, vibration (general and local), the duration of focused attention, fixed posture.

The certification of working conditions in workplaces, along with the time factor of the exposure, made it possible to establish the class of working conditions for these occupations as “harmful”, within the limits of 3.3–3.4.

Analysis of attestation documents showed that in 83% of cases calculation did not take into account all indicators typical for occupations like logger and lumberjack.

Key words: certification, photos of work time protocol, working conditions, noise, vibration, microclimate.

Введение. Как показывает практика, своевременность и качество проведения аттестации рабочих мест по условиям труда в лесохозяйственной отрасли необходимы из-за того, что на значительное количество рабочих мест в данной отрасли распространяется обязанность нанимателей по профессиональному пенсионному страхованию работников. Это рабочие места, предусмотренные Списками № 1 (список производств, работ, профессий, должностей и показателей на подземных работах, на работах с особо вредными и особо тяжелыми условиями труда, занятость в которых дает право на пенсию по возрасту за работу с особыми условиями труда)

и № 2 (список производств, работ, профессий, должностей и показателей на работах с вредными и тяжелыми условиями труда, занятость в которых дает право на пенсию по возрасту за работу с особыми условиями труда) [1].

Главой 37 Списка № 1 предусмотрены профессии: вальщик леса; раскряжевщик – с условием работы на лесосеке, лесопогрузочном пункте, верхних и промежуточных складах. Главой 37 Списка № 2 предусматривается ряд профессий без дополнительных условий: вздымщик, вздымосборщик, лебедчик по трелевке леса, машинист лесозаготовительной машины, обрубщик сучьев, тракторист на подготовке лесосек, трелевке и вывозке леса, трелевщик, чокеровщик, а также с дополнительным условием – работы на лесосеках, лесопогрузочных пунктах, верхних и промежуточных складах: машинист-крановщик, навальщик-свальщик лесоматериалов, слесарь по ремонту лесозаготовительного оборудования, штабелевщик древесины. В данной отрасли могут быть рабочие места водителей автомобилей, которые с условием занятости на вывозке леса тоже предусмотрены Списком № 2 (гл. 52) [2, 3].

С целью оценки качества проведения аттестации рабочих мест по условиям труда были проанализированы ее результаты для четырех основных профессий при выполнении лесосечных работ: вальщик леса; лесоруб (бензопилой); тракторист на подготовке лесосек, трелевке и вывозке леса; водитель автомобиля (вывозка леса). Исследовались условия труда рабочих указанных профессий Гомельского, Лельчицкого, Волковысского, Слонимского, Сморгонского, Пуховичского, Осиповичского лесхозов республики.

Основная часть. Проведенный анализ карт фотографии рабочего времени и карт условий труда на рабочем месте показал, что имеется ряд отступлений от нормативных правовых актов.

Необходимо отметить, что при проведении аттестации оценке должны подлежать все присутствующие на рабочем месте вредные и опасные производственные факторы, тяжесть и напряженность трудового процесса, обусловленные выполнением должностных обязанностей по данной профессии.

Аттестация проводится на тех рабочих местах, на которых, по мнению аттестационной комиссии (с учетом требований соответствующих нормативных правовых актов, результатов государственного санитарного надзора, периодического контроля за состоянием охраны труда и т. д.), условия труда не соответствуют санитарно-гигиеническим нормативам и работникам могут быть установлены соответствующие виды компенсаций [4, 5].

Оценка факторов производственной среды, тяжести и напряженности трудового процесса проводится путем сопоставления полученных в результате измерений и исследований их фактических величин с гигиеническими нормативами и последующим соотнесением величин отклонения каждого фактора производственной среды, тяжести и напряженности трудового процесса с критериями, на основании которых устанавливается класс условий труда [6].

Фотография рабочего места. Перед началом измерений уровней вредных и опасных производственных факторов аттестационная комиссия проводит обследование рабочего места в целях проверки на соответствие производственного оборудования и технологического процесса требованиям охраны труда и принимает меры по устранению выявленных недостатков. Затем аттестационная комиссия организует проведение фотографии рабочего времени [7].

На основании результатов карты фотографии рабочего времени определяются:

– структура рабочего времени;

– время воздействия вредных и опасных производственных факторов, тяжести и напряженности трудового процесса;

– занятость с вредными и опасными условиями труда.

В фотографиях рабочего времени заполняется графа «Наименование вредного фактора» [8]. Это позволяет получить исходные данные о продолжительности действия факторов производственной среды, а также подтверждение (наличия либо отсутствия) показателей тяжести и напряженности трудового процесса. Для профессий «вальщик леса» и «лесоруб» – это шум, вибрация, нахождение в неудобной позе, работа на открытом воздухе; для профессий «тракторист на подготовке лесосек, трелевке и вывозке леса» и «водитель автомобиля» (вывозка леса) – это шум, вибрация (общая и локальная), длительность сосредоточенного внимания, фиксированная поза.

Анализ документов по аттестации показал, что на карте фотографии рабочего времени не всегда указывается наименование вредного фактора (Сморгонский опытный лесхоз, профессия вальщик леса).

Измерения уровней вредных и (или) опасных производственных факторов для аттестации осуществляют аккредитованные испытательные станции в присутствии представителей аттестационной комиссии.

Анализ документов по последней аттестации показал, что в 47% случаев графа «Номер и дата утверждения протокола измерений и (или) исследований» карт аттестации рабочего места по условиям труда не заполнена. В некоторых картах в этой графе записано «согласно карте

фотографии рабочего дня», что не соответствует требуемой записи (Россонский лесхоз, результаты оценки тяжести трудового процесса).

Тяжесть трудового процесса. К показателям тяжести трудового процесса относятся:

– физическая динамическая нагрузка;

– масса поднимаемого и перемещаемого груза вручную (кг);

– стереотипные рабочие движения (количество за смену);

– статическая нагрузка;

– рабочая поза;

– наклоны корпуса;

– перемещения в пространстве, обусловленные технологическим процессом.

Фактическое значение конкретного показателя тяжести трудового процесса устанавливается посредством количественных измерений и расчетов, оформленных протоколом, который в обязательном порядке прилагается к карте аттестации рабочего места по условиям труда. К сожалению, как уже отмечалось выше, это требование не всегда выполняется.

Анализ документов по аттестации показал, что в 83% случаев приведен расчет не всех показателей, характерных для таких рабочих мест, как вальщик леса и обрубщик сучьев.

Следует отметить, что оценка условий труда и отнесение их к классу 3.1 по показателю «рабочая поза стоя» проводится на постоянных рабочих местах, на которые согласно технологическому процессу работник выполняет свои трудовые функции стоя 80% и более времени смены. Если работник перемещается в нескольких рабочих зонах в течение смены, оценка тяжести труда на его рабочем месте проводится раздельно по показателям «рабочая поза стоя» и «перемещение в пространстве, обусловленные технологическим процессом». Время пребывания в положении стоя и время перемещения в пространстве подсчитываются отдельно.

Известно, что в процессе трудовой деятельности вальщики леса и лесорубы работают как стоя, так и перемещаются в пространстве. Однако не во всех документах по аттестации этот показатель учитывается отдельно.

Анализ расчетов показателей трудового процесса «наклоны корпуса» на рабочих местах вальщика леса и лесоруба (обрубщика сучьев) позволил установить, что на работах с применением бензопилы могут быть выражены статическая нагрузка (удержание пилы двумя руками), наклоны корпуса. Так, на рабочем месте вальщика леса были посчитаны наклоны корпуса при подготовке рабочего места около спиливаемых деревьев (обрезка или обрубка кустарника, очистка от сучьев, веток и другой древесной зелени в радиусе 4 м), при выполнении подпила ствола дерева на высоте 10–20 см от поверхности земли с одной стороны, при выполнении основного реза, при сборе порубочных остатков в кучи. На рабочем месте обрубщика сучьев – при обрезке бензопилой сучьев и вершин с поваленных деревьев, сборе в кучи сучьев для измельчения на порубочные остатки, окучивании делового долготья и коротья (дров), укладке их в поленницы.

По анализируемым материалам аттестации рабочих мест основных профессий лесозаготовительного производства такие показатели тяжести трудового процесса, как физическая и динамическая нагрузка, масса поднимаемого и перемещаемого груза вручную, стереотипные рабочие движения, рабочая поза и перемещение в пространстве, находятся в рамках оптимального или допустимого класса условий труда.

Напряженность трудового процесса. Анализ проведенных оценок показателей напряженности трудового процесса выявил, что на рабочих местах рабочих указанных выше профессий итоговая оценка условий труда по напряженности трудового процесса различна (оптимальному классу в 37% случаев, допустимому в 52% случаев, вредному классу 3.1 – 5%, вредному классу 3.2 – 6% случаев).

Итоговая оценка по напряженности трудового процесса на рабочих местах вальщика леса, обрубщика сучьев, тракториста на трелевке и водителя на вывозке леса соответствует классу 3.2. По показателю «степень риска для собственной жизни» устанавливается класс 3.3.

Факторы производственной среды. Сведения о результатах оценки условий труда заносятся в карту аттестации рабочего места по условиям труда.

На рабочем месте вальщика леса и обрубщика сучьев (бензопилой) в воздухе рабочей зоны одновременно присутствуют три вредных вещества однонаправленного действия: предельные углеводороды в концентрации 17,2 мг/м^3 (ПДК – 900 мг/м^3), оксид углерода 8,4 мг/м^3 (ПДК – 20 мг/м^3) и двуокись азота 0,8 мг/м^3 (ПДК – 2 мг/м^3) [9]. Как видим, все указанные вредные вещества не превышают ПДК и итоговая оценка на рабочем месте вальщика леса и обрубщика сучьев по химическому фактору соответствует допустимому классу условий труда – 2.

Шум. На рабочих местах рассматриваемых рабочих профессий уровень звука составляет: у вальщика леса – 86–97 дБА (класс условий труда 3.2–3.3); обрубщика сучьев – 84–94 дБА (класс условий труда 3.2); тракториста на трелевке и вывозке леса – 85–87 дБА (класс условий труда 3.2); водителя автомобиля на вывозке леса – 84–87 дБА (класс условий труда 3.2) [10]. Итоговая оценка по шуму соответствует классу 3.2.

Итоговая оценка условий труда основных профессий лесозаготовительного производства

Результаты аттестации рабочего места	Вальщик леса	Обрубщик сучьев (бензопилой)	Тракторист на подготовке лесосек, трелевке и вывозке леса	Водитель автомобиля на вывозке леса
Общая оценка условий труда (класс условий труда)	3.3 3.4	3.2 3.3	3.2 3.2	3.2 3.2
Обязанности нанимателя по профессиональному пенсионному страхованию работников	Список № 1	Список № 2	Список № 2	Список № 2
Дополнительный отпуск (количество календарных дней)	14 21	7 14	7 14	7 14
Доплата за работу с вредными и (или) опасными условиями труда (% тарифной ставки первого разряда за 1 ч работы)	0,20 0,25	0,14 0,20	0,14 0,20	0,14 0,20

Вибрация. Для профессий вальщик леса и обрубщик сучьев вредным производственным фактором является вибрация общая и локальная. Измерения виброскорости проводятся по трем осям (x, y, z), а оценка – по эквивалентному корректированному по частоте уровню [11].

На рабочем месте вальщика леса локальная вибрация составляет 78–86 дБ (класс 3.1–3.3), обрубщика сучьев – 75–83 дБ (класс 3.1–3.3) при нормируемом значении 76 дБ. Итоговая оценка условий труда вальщика и обрубщика сучьев по вибрации соответствует классу 3.3 [12].

Тракторист на трелевке леса и водитель автомобиля на вывозке леса подвергаются воздействию общей вибрации 74–75 дБ при нормируемом значении 65 дБ (класс условий труда 3.1), локальной вибрации 84–86 дБ при ПДУ 76 дБ (класс условий труда 3.3).

Микроклимат. Условия труда вальщика леса и обрубщика сучьев при обусловленной необходимости выполнения технологического процесса на открытом воздухе оцениваются классом 3.1 при условии выполнения работ 80% и более от продолжительности рабочего времени [13].

Итоговая оценка условий труда основных профессий лесозаготовительного производства указана в таблице.

Заключение. Анализ документов аттестации рабочих мест по условиям труда показал, что при проведении исследований соответствия санитарно-гигиенических параметров условий труда действующим нормативам имеются отступления от требований технических нормативных правовых актов по проведению исследований.

Руководителям организаций при выборе исполнителей для проведения данных исследований необходимо подходить более взвешенно, чтобы данная работа проводилась на высоком профессиональном уровне.

Кроме этого в организациях согласно [14, 15] должен ежегодно разрабатываться и утверждаться работодателем Перечень производственных факторов с указанием периодичности их контроля на рабочих местах.

Список литературы

1. Ковалева О. Н. Важные вопросы проведения аттестации рабочих мест по условиям труда // Я – специалист по охране труда. 2018. № 3. С. 14–18.

2. Ковалева О. Н. Аттестация рабочих мест в лесохозяйственной отрасли // Я – специалист по охране труда. 2019. № 8. С. 11–17.

3. О списках производств, работ, профессий, должностей и показателей, дающих право на пенсию по возрасту за работу с особыми условиями труда: постановление Совета Министров Республики Беларусь, 25 мая 2005 г. № 536 // Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь. URL: http://www.pravo.by/document/?guid=2012&oldDoc=2005-87/2005-87(016-028).pdf&oldDocPage=6 (дата обращения: 17.02.2020).

4. Гудзь О. В. Анализ результатов аттестации рабочих мест по условиям труда // Охрана труда и социальная защита. 2010. № 1. С. 19–25.

5. Положение о порядке проведения аттестации рабочих мест по условиям труда: постановление Совета Министров Республики Беларусь, 22 февраля 2008 г. № 253 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: http://www.pravo.by/document/?guid=2012&oldDoc=2008-54/2008-54(019-069).pdf&oldDocPage=39 (дата обращения: 18.02.2020).

6. Гигиеническая классификация условий труда: постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь, 28 декабря 2012 г. № 211 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: http://www.pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21326895p&p1=1 (дата обращения: 17.02.2020).

7. Инструкция по оценке условий труда при аттестации рабочих мест по условиям труда: постановление Министерства труда и социальной защиты Республики Беларусь, 22 февраля 2008 г. № 35 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: http://www.pravo.by/document/?guid=2012&oldDoc=2008-66/2008-66(134-175).pdf&oldDocPage=1 (дата обращения: 17.02.2020).

8. Об установлении форм: постановление Министерства труда и социальной защиты Республики Беларусь, 23 декабря 2016 г. № 74 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: http://www.pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21731683&p1=1 (дата обращения: 17.02.2020).

9. Санитарные нормы и правила «Требования к контролю воздуха рабочей зоны», гигиенические нормативы «Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны», «Ориентировочные безопасные уровни воздействия вредных веществ в воздухе рабочей зоны», «Предельно допустимые уровни загрязнения кожных покровов вредными веществами»: постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 11 октября 2017 г. № 92 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: http://www.pravo.by/document/-?guid=12551&p0=W21732492p&p1=1 (дата обращения: 17.02.2020).

10. Санитарные нормы, правила и гигиенические нормативы «Шум на рабочих местах, в транспортных средствах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки»: постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 16 ноября 2011 г. № 115 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: http://www.pravo.by/document/?guid=2012&oldDoc=2011-143/2011_143_8_24521.pdf&oldDocPage=1 (дата обращения: 17.02.2020).

11. Санитарные нормы и правила «Требования к производственной вибрации, вибрации в жилых помещениях, помещениях административных и общественных зданий», Гигиенический норматив «Предельно допустимые и допустимые уровни нормируемых параметров при работах с источниками производственной вибрации, вибрации в жилых помещениях, помещениях административных и общественных зданий»: постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 26 декабря 2013 г. № 132 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: http://www.pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21428310p&p1=1 (дата обращения: 17.02.2020).

12. Ермак И. Т., Гармаза А. К., Радченко Ю. С. Влияние шумовой и вибрационной нагрузки на условия труда рабочих Негорельского учебно-опытного лесхоза // Технология органических веществ: тезисы 82-ой НТК ППС, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 1–14 февраля 2018 г. Минск: БГТУ, 2018. С. 13. URL: https://www.belstu.by/Portals/0/userfiles/37/0003-Tezisi-TOV-2018.pdf (дата обращения: 17.02.2020).

13. Санитарные нормы и правила «Требования к микроклимату рабочих мест в производственных и офисных помещениях», Гигиенический норматив «Показатели микроклимата производственных и офисных помещений»: постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 30 апреля 2013 г. № 33 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: http://www.pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21327576p&p1=1 (дата обращения: 17.02.2020).

14. Санитарные нормы и правила «Требования к организациям, осуществляющим обработку древесины и производство изделий из дерева»: постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 25 июля 2016 г. № 92 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: http://www.pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21631168p&p1=1 (дата обращения: 17.02.2020).

15. Специфические санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда работающих: постановление Совета Министров Республики Беларусь, 1 февраля 2020 г. № 66 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: http://www.pravo.by/document/?guid=12551-&p0=C22000066&p1=1 (дата обращения: 17.02.2020).

References

1. Kovaleva O. N. Important issues of certification of workplaces by working conditions. *Ya – spetsialist po okhrane truda* [I am a labor safety specialist]. 2018, no. 3, pp. 14−18 (In Russian).

2. Kovaleva O. N. Certification of jobs in the forestry industry. *Ya – spetsialist po okhrane truda* [I am a labor safety specialist]. 2019, no. 8, pp. 11−17 (In Russian).

3. *O spiskakh proizvodstv, rabot, professiy, dolzhnostey i pokazateley, dayushchikh pravo na pensiyu po vozrastu za rabotu s osobymi usloviyami truda: postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus',*

25 maya 2005 g. no. 536 [On the lists of productions, works, professions, positions and indicators giving the right to an old-age pension for work with special working conditions: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, May 25, 2005 no. 536]. Available at: http://www.pravo.by/document/?guid=2012&oldDoc=2005-87/2005-87(016-028).pdf&oldDocPage=6 (accessed 17.02.2020).

4. Gudz' O. V. Analysis of the results of certification of workplaces by working conditions. *Okhrana truda i sotsial'naya zashchita* [Labor protection and social protection]. 2010, no. 1, pp. 19−25 (In Russian).

5. *Polozhenie o poryadke provedeniya attestatsii rabochikh mest po usloviyam truda: postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus', 22 fevralya 2008 g. no. 253* [Regulation on the procedure for certification of jobs in terms of working conditions: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, February 22, 2008, no. 253]. Available at: http://www.pravo.by/document/?guid=2012&oldDoc=2008-54/2008-54(019-069).pdf&oldDocPage=39 (accessed 18.02.2020).

6. *Gigienicheskaya klassifikatsiya usloviy truda: postanovlenie Ministerstva zdravookhraneniya Respubliki Belarus', 28 dekabrya 2012 g. no. 211* [Hygienic classification of working conditions: Decree of the Ministry of Health of the Republic of Belarus, December 28, 2012, no. 211]. Available at: http://www.pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21326895p&p1=1 (accessed 17.02.2020).

7. *Instruktsiya po otsenke usloviy truda pri attestatsii rabochikh mest po usloviyam truda: postanovlenie Ministerstva truda i sotsial'noy zashchity Respubliki Belarus', 22 fevralya 2008 g. no. 35* [Instructions on the assessment of working conditions for certification of workplaces on working conditions: Resolution of the Ministry of Labor and Social Protection of the Republic of Belarus, February 22, 2008, no. 35]. Available at: http://www.pravo.by/document/?guid=2012&oldDoc=2008-66/2008-66(134-175).pdf&oldDocPage=1 (accessed 17.02.2020).

8. *Ob ustanovlenii form: postanovlenie Ministerstva truda i sotsial'noy zashchity Respubliki Belarus', 23 dekabrya 2016 g. no. 74* [On the establishment of forms: Resolution of the Ministry of Labor and Social Protection of the Republic of Belarus, December 23, 2016, no. 74]. Available at: http://www.pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21731683&p1=1 (accessed 17.02.2020).

9. *Sanitarnyye normy i pravila «Trebovaniya k kontrolyu vozdukha rabochey zony», gigienicheskie normativy «Predel'no dopustimye kontsentratsii vrednykh veshchestv v vozdukhe rabochey zony», «Orientirovochnye bezopasnye urovni vozdeystviya vrednykh veshchestv v vozdukhe rabochey zony», «Predel'no dopustimye urovni zagryazneniya kozhnykh pokrovov vrednymi veshchestvami»: postanovlenie Ministerstva zdravookhraneniya Respubliki Belarus' ot 11 oktyabrya 2017 g. no. 92* [Sanitary norms and rules "Requirements for air control of the working area", hygienic standards "Maximum permissible concentrations of harmful substances in the air of the working zone", "Estimated safe levels of exposure to harmful substances in the air of the working zone", "Maximum permissible levels of contamination of the skin with harmful substances" : Decree of the Ministry of Health of the Republic of Belarus of October 11, 2017, no. 92]. Available at: http://www.pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21732492p&p1=1 (accessed 17.02.2020).

10. *Sanitarnyye normy, pravila i gigienicheskie normativy «Shum na rabochih mestah, v transportnyh sredstvah, v pomeshhenijah zhilyh, obshhestvennyh zdanij i na territorii zhiloj zastrojki»: postanovlenie Ministerstva zdravoohranenija Respubliki Belarus' ot 16 nojabrja 2011 g. no. 115* [Sanitary norms, rules and hygienic standards "Noise at workplaces, in vehicles, in residential, public buildings and residential buildings": Decree of the Ministry of Health of the Republic of Belarus of November 16, 2011 no. 115]. Available at: http://www.pravo.by/document/?guid=2012&oldDoc=2011-143/2011_143_8_24521.pdf&oldDocPage=1 (accessed 17.02.2020).

11. *Sanitarnyye normy i pravila «Trebovaniya k proizvodstvennoy vibracii, vibracii v zhilyh pomeshheniyah, pomeshheniyah administrativnyh i obshhestvennyh zdaniy», Gigienicheskiy normativ «Predel'no dopustimye i dopustimye urovni normiruemyh parametrov pri rabotah s istochnikami proizvodstvennoy vibracii, vibracii v zhilyh pomeshheniyah, pomeshheniyah administrativnyh i obshhestvennyh zdaniy»: postanovlenie Ministerstva zdravoohraneniya Respubliki Belarus' ot 26 dekabrya 2013 g. no. 132* [Sanitary norms and rules "Requirements for industrial vibration, vibration in residential premises, premises of administrative and public buildings", Hygienic standard "Maximum permissible and permissible levels of normalized parameters when working with sources of industrial vibration, vibration in residential premises, premises of administrative and public buildings" : Decree of the Ministry of Health of the Republic of Belarus of December 26, 2013 no. 132]. Available at: http://www.pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21428310p&p1=1 (accessed 17.02.2020).

12. Ermak I. T., Garmaza A. K., Radchenko Ju. S. [The influence of noise and vibration load on working conditions of workers of the Negorelsky training and experimental leshoz]. *Tekhnologiya organicheskikh veshchestv: tezisy 82-oy NTK PPS, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov, Minsk, 1–14 fevralya 2018 g. Minsk: BGTU*, 2018. p. 13. (In Russian). Available at: https://www.belstu.by/Portals/0/userfiles/37/-0003-Tezisi-TOV-2018.pdf (accessed 17.02. 2020).

13. *Sanitarnye normy i pravila «Trebovaniya k mikroklimatu rabochikh mest v proizvodstvennykh i ofisnykh pomeshcheniyakh», Gigienicheskiy normativ «Pokazateli mikroklimata proizvodstvennykh i ofisnykh pomeshheniy»: Postanovleniye Ministerstva zdravookhraneniya Respubliki Belarus' ot 30 aprelya 2013 g. no. 33* [Sanitary norms and rules "Requirements for the microclimate of wyorkplaces in industrial and office premises", Hygienic standard "Indices of the microclimate of industrial and office premises": Decree of the Ministry of Health of the Republic of Belarus of April 30, 2013, no. 33]. Available at: http://www.pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21327576p&p1=1 (accessed 17.02.2020).

14. *Sanitarnyye normy i pravila «Trebovaniya k organizatsiyam, osushchestvlyayushchim obrabotku drevesiny i proizvodstvo izdeliy iz dereva»: postanovleniye Ministerstva zdravookhraneniya Respubliki Belarus' ot 25 iyulya 2016 g. no. 92* [Sanitary norms and rules "Requirements for organizations engaged in wood processing and the manufacture of wood products": Decree of the Ministry of Health of the Republic of Belarus of July 25, 2016 no. 92]. Available at: http://www.pravo.by/document/?guid=12551&p0=-W21631168p&p1=1 (accessed 17.02.2020).

15. *Spetsificheskiye sanitarno-epidemiologicheskiye trebovaniya k usloviyam truda rabotayushchikh: Postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus', 1 fevralya 2020 g. no. 66* [Specific sanitary and epidemiological requirements for working conditions of workers: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, February 1, 2020 no. 66]. Available at: http://www.pravo.by/document/?guid=-12551&p0=C22000066&p1=1 (accessed 17.02.2020).

Информация об авторах

Ермак Иван Тимофеевич – кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: ite2009@tut.by

Гармаза Андрей Константинович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск. ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: garmaza@belstu.by.

Information about the authors

Yermak Ivan Timofeevich – PhD (Biology), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Occupational Safety. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ite2009@tut.by.

Garmaza Andrei Konstantinovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Occupational Safety. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: garmaza@belstu.by

Поступила 09.03.2020

УДК 621.573(047):536.24

В. Б. Кунтыш, А. Б. Сухоцкий, Г. С. Маршалова, В. Н. Фарафонтов
Белорусский государственный технологический университет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА НА ТЕПЛООТДАЧУ ТЕПЛООБМЕННЫХ СЕКЦИЙ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

В известных обобщенных уравнениях подобия по конвективному теплообмену поперечно обтекаемых вынужденным потоком воздуха шахматных пучков, предложенных В. Б. Кунтышем для теплового расчета аппаратов воздушного охлаждения (АВО) с секциями из биметаллических труб со спиральными алюминиевыми ребрами, Е. Н. Письменным и В. Ф. Юдиным, используемых при расчетах энергетических теплообменников из монометаллических труб с шайбовыми и спиральными стальными ребрами не отражено влияние температурного фактора на интенсивность теплоотдачи. В указанных обобщенных уравнениях подобия при внешнем поперечном обтекании газовым потоком пучков из ребристых труб физические свойства потока в числах подобия Nu и Re принимаются постоянными, не зависящими от температуры, что имеет место при изотермическом течении. В действительности процесс конвективного теплообмена между твердой стенкой и потоком является неизотермическим, вызывающим изменение физических свойств потока воздуха (газа) с переменностью температуры. Для учета влияния этого фактора вводится температурный фактор, представляющий отношение абсолютных средних температур стенки трубы и потока.

В известных публикациях влияние температурного фактора на теплообмен всесторонне теоретически и экспериментально изучено при продольном течении газового потока внутри труб и гладких кольцевых каналов, а также при внешнем поперечном отрывном обтекании гладкотрубных шахматных и коридорных пучков. Однако количество исследований по температурному фактору применительно к ребристым пучкам в потоке воздуха весьма ограниченно, при этом результаты их имеют противоречивый качественный и количественный характер. Для обеспечения надежности и достоверности теплового расчета АВО, учитывая огромные масштабы их применения в различных отраслях народного хозяйства, промышленности и науки, необходимы дальнейшие эксперименты в этом направлении. Поэтому нами выполнены опыты, учитывающие диапазон изменения температурного фактора для условий эксплуатации теплообменных секций АВО природного газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов.

Ключевые слова: температурный фактор, биметаллическая ребристая труба, поток воздуха, конвективная теплоотдача, шахматный пучок, аппарат воздушного охлаждения.

V. B. Kuntysh, A. B. Sukhotski, G. S. Marshalova, V. N. Farafontov
Belarusian State Technological University

EXPERIMENTAL RESEARCH OF INFLUENCE OF THE TEMPERATURE FACTOR ON HEAT TRANSFER OF SECTIONS OF AIR COOLED HEAT EXCHANGERS OF NATURAL GAZ

In the known generalised equations of similarity on convective heat exchange cross-section flowed round the compelled flow of air of the chess bunches offered by V. B. Kuntysh for thermal calculation of air cooled heat exchangers (AVO) with sections from bimetallic pipes with spiral aluminium edges, E. N. Pismennyi and V. F. Yudin, power heat exchangers used at calculations from monometallic tubes with washer and spiral steel edges does not reflect influence of the temperature factor on intensity of heat exchange. In the specified generalised equations of similarity at an external cross-section flow from ridge pipes physical properties of a flow in numbers of similarity Nu and Re are accepted by a gas flow of bunches by the constants which are not dependent on temperature that takes place at an isothermal current. Actually process convective heat exchange between a firm wall and a flow is not isothermal, causing change of physical properties of a flow of air (gas) with variability of temperature. For the account of influence of this factor the temperature factor representing the relation of absolute average temperatures of a wall of tube and flow is entered.

In known publications influence of the temperature factor on heat exchange comprehensively theoretically also is experimentally studied at a longitudinal current of a gas flow in tubes and smooth ring channels, and also at external cross-section brake-off flow smooth tubes chess and corridor bunches.

Rather limited quantity of researches under the temperature factor with reference to ridge bunches in air flow is known, thus their results have inconsistent qualitative and quantitative character. For maintenance of reliability and reliability of thermal calculation AVO, considering huge scales of their application in various branches of a national economy, the industries and sciences are necessary the further researches in this direction. Therefore we execute the experiences considering a range of change of the temperature factor for service conditions heat exchangers of sections AVO of natural gas at compressor stations of the main gas tubelines.

Key words: temperature factor, bimetallic ribbed tube, flow of air, convective heat exchange, chess bunch, air cooled heat exchangers.

Введение. Затруднительно отыскать отрасль народного хозяйства, в которой не применялись бы аппараты воздушного охлаждения (АВО), но наиболее крупным потребителем их является газовая промышленность, в частности, компрессорные станции магистральных газопроводов, расположенные в различных климатических зонах от Крайнего Севера до юга и юго-восточных регионов России. Основным конструктивным элементом аппарата является теплообменная секция из биметаллических ребристых труб (БРТ) со спиральными алюминиевыми ребрами, поперечно обтекаемых принудительным потоком атмосферного воздуха. БРТ расположены в трубных решетках шахматно и образуют трубный пучок при числе поперечных рядов $z = 4{-}6$.

При проектировании отечественных АВО для теплового расчета теплообменных секций преимущественно используется обобщенное уравнение конвективного теплообмена для шахматных пучков БРТ с алюминиевыми спиральными накатными, навитыми завальцованными в стенку несущей трубы и KLM-ребрами, так называемое уравнение АГТУ (Архангельского государственного технического университета), предложенное В. Б. Кунтышем [2] в результате обработки большого объема опытных данных по теплоотдаче отдельных шахматных пучков с компоновочными параметрами труб, геометрическими размерами ребер и их материальным исполнением, характерных для таких аппаратов. В зарубежной практике проектирования АВО для расчетов применяется уравнение подобия Х. Уонга [3]. Для расчета энергетических теплообменников паровых котлов, тепловых и атомных электростанций применяются обобщенные уравнения конвективной теплоотдачи шахматных и коридорных пучков из монометаллических стальных ребристых труб, обтекаемых поперечным газовым потоком, которые предложены В. Ф. Юдиным [4] (ЦКТИ им. И. И. Ползунова) и Е. Н. Письменным [5] (Киевский политехнический институт − КПИ). Они базируются на данных по теплоотдаче пучков, компоновочные и геометрические параметры ребер которых значительно отличаются от БРТ АВО.

В числах подобия Nu, Re указываемых уравнений подобия, получаемых из дифференциальных уравнений для конвективного теплообмена и гидродинамики, физические свойства потока принимаются постоянными, не зависящими от температуры. В реальных процессах теплообмена физические свойства изменяются с температурой, и это учитывается дополнительным критерием $\psi = T_{ст} / T_{п}$, который представляет отношение абсолютных средних температур твердой стенки и газового потока, обтекающего стенку. Этот критерий принято называть температурным фактором, и его отсутствие в правой части уравнений подобия АГТУ, ЦКТИ, КПИ предполагает его равным единице. Количественное влияние его на интенсивность теплообмена неодинаково [6] и существенно зависит от направления движения газового потока относительно поверхности теплообмена и ее конструктивного типа. При внешнем обтекании трубы (пучка труб) газовым потоком оно слабее по сравнению с безотрывным течением внутри труб и каналов. К настоящему времени влияние температурного фактора достаточно полно изучено применительно к теплообмену гладкотрубных поверхностей для различных условий движения потока газа (воздуха) [7−10] и известны рекомендации [11] его количественного учета. Для гладкотрубных пучков, поперечно обтекаемых газовым потоком, при расчете теплоотдачи поправку на влияние температурного фактора вводить не следует.

К настоящему времени известны единичные исследования [12, 13] влияния температурного фактора на теплоотдачу пучков из ребристых труб при поперечном омывании газовым потоком. Опыты [12] выполнены на шестирядных пучках, собранных из стальных труб с диаметром по основанию ребра $d_0 = 120$ мм, высотой ребра $h = 60$ мм, шагом ребер $s = 25$ мм и толщиной ребра $\Delta = 3{,}75$ мм, коэффициент оребрения трубы $\varphi = 8{,}35$, в условиях нагревания воздуха методом локального теплового моделирования, а при охлаждении дымовых газов применено полное тепловое моделирование. Калориметр устанавливался в 4-м поперечном ряду. Физические константы воздуха отнесены к температуре стенки трубы. Переход от случая

нагревания к охлаждению газового потока вызывает снижение числа Nu (безразмерной теплоотдачи) на 25%. Но полученный результат не нашел подтверждения в работе [4], в которой экспериментально установлено, что направление теплового потока не влияет на теплоотдачу ребристого пучка. Метод моделирования теплоотдачи локальный в обоих режимах, т. е. одинаков, теплоноситель также одинаков – воздух. Пучок собран из стальных ребристых труб $d_0 \times h \times s \times \Delta = 23 \times 10 \times 8 \times 2$ мм, $\varphi = 4{,}7$.

Для получения поправочных коэффициентов к обобщенным уравнениям подобия теплоотдачи пучков ребристых труб при поперечном обтекании потоком воздуха, работающих в различных температурных условиях, выполнено экспериментальное [13] исследование трех четырехрядных шахматных пучков локальным тепловым моделированием. Калориметр устанавливался в третий по ходу потока поперечный ряд. Пучки собирались из монометаллических стальных точеных труб с $d_0 = 60$ мм; $h = 5$; 20; 40 мм; $s = 8$ мм; $\Delta = 3$; 3,3; 3,5 мм; $\varphi = 2{,}4$; 7,9 и 18,2. Шаги труб в решетках пучка: поперечный $S_1 = 199{,}8$ мм, продольный $S_2 = 240$ мм.

Опыты проведены при температурах стенки трубы у основания ребер $t_{ст} = 50$; 100; 200; 300; 400 и 500°С, а температура потока воздуха была примерно $t_п = 30$°С. По опытным данным вычисляли приведенный коэффициент теплоотдачи. Температурный фактор изменялся в интервале $\psi = 1{,}1–2{,}6$. Числа Nu для пучков ребристых труб с различным температурным фактором имеют значительное расслоение, причем оно более значительное при обработке опытных данных по температуре стенки, чем по температуре потока. Влияние температурных условий на теплоотдачу пучков ребристых труб в области изменения $\psi = 1{,}1–2{,}6$ может быть учтено критерием $(T_{ст} / T_п)^{-0{,}3}$ вводимого в правую часть уравнения подобия теплоотдачи $\mathrm{Nu} = f(\mathrm{Re})$ в качестве дополнительного сомножителя, а физические свойства газового потока принимаются в числах Nu и Re по температуре потока. Опыты проведены в диапазоне изменения числа $\mathrm{Re} = w\, d_0 / \nu = 10^4–10^5$, где w – скорость потока теплоносителя в сжатом сечении пучка, м/с; ν – коэффициент кинематической вязкости теплоносителя, м^2/с.

Геометрические параметры изученных труб, их материальное исполнение, компоновочные характеристики пучков существенно отличаются от таковых, применяемых в шахматных пучках теплообменных секций АВО. Естественно, что непосредственное применение количественных результатов и рекомендаций не может быть использовано в тепловых расчетах АВО, что предопределило цель предлагаемого экспериментального исследования.

Цель работы – экспериментальное определение влияния температурного фактора на теплоотдачу биметаллического оребренного пучка для условий эксплуатации теплообменных секций АВО природного газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов.

Основная часть. Объектом опытов явился шахматный шестирядный пучок с шагами труб $S_1 = 68$ мм, $S_2 = 50$ мм, которым соответствовали относительные шаги $\sigma_1 = S_1 / d = 1{,}214$ и $\sigma_2 = S_2 / d = 0{,}893$. Пучок собирался из серийных биметаллических труб с накатными однозаходными алюминиевыми ребрами $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta = 56 \times 26{,}8 \times 14{,}6 \times 2{,}5 \times 0{,}5$ мм, $\varphi = 19{,}26$. Здесь $d_0 = d - 2h$ – диаметр трубы по основанию ребер. Ребра накатаны на гладкой (стальной) трубе наружного диаметра 25 мм. Отрезная длина труб составляла 330 мм при длине оребренной части 300 мм. Трубные решетки пучка выполнены из древесно-стружечной плиты толщиной 20 мм.

Пучок устанавливался в рабочем участке аэродинамической трубы разомкнутого типа с поперечным сечением в свету 300×300 мм и обтекался принудительным перпендикулярным продольной оси труб потоком воздуха.

Для измерения теплоотдачи применено локальное тепловое моделирование с помощью электрокалориметра [14], устанавливаемого в середине третьего поперечного ряда пучка. Температуру поверхности трубы по основанию ребер измеряли четырьмя термопарами, подводимую к калориметру электрическую мощность − ваттметром. Также измеряли трубкой Прандтля динамический напор воздуха, температуру воздуха перед и за пучком. Торцевые потери тепла калориметром составляли 10 Вт.

По данным измерений рассчитывали средний приведенный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·К):

$$\alpha = Q / \left(F \left(t_{ст} - t_п \right) \right), \qquad (1)$$

где Q – тепловой поток, переданный воздуху конвекцией, Вт; $t_{ст}$ – средняя температура по основанию ребер трубы-калориметра, °С; $t_п$ – средняя температура потока воздуха, набегающего на калориметр, °С; F – полная площадь внешней теплоотдающей поверхности калориметра, м^2.

В опытах температура $t_п$ изменялась в интервале 19,2−20,9°С, а при расчетах температурного фактора принята $t_п = 20$°С ($T_п = 293$ К).

Экспериментальные данные обрабатывались в безразмерных числах подобия Нуссельта $\mathrm{Nu} = \alpha\, d_0 / \lambda$, Рейнольдса $\mathrm{Re} = \omega\, d_0 / \nu$, где λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К); ω – скорость воздуха в сжатом попе-

речном сечении пучка, м/с; ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м^2/с. Физические параметры воздуха λ, ν определялись по его средней температуре в пучке.

Скорость воздуха соответствовала интервалу ω = 1,7−10,7 м/с и охватывала рабочие режимы эксплуатации АВО.

При проектировании отечественных АВО на давление охлаждающего газа 7,4 МПа закладываются следующие температурные режимы: температура газа на входе t_{21} = 75°С, на выходе t_{22} = 45°С, температура окружающего воздуха $t_{воз}$ = 30°С.

В связи с этим опыты проводились при трех постоянных значениях температуры стенки трубы-калориметра $t_{ст}$ = 39,5; 70,3; 101°С ($T_{ст}$ = = 312,5; 343,3; 374 К), значения температурного фактора для которых были ψ = 1,066; 1,17; 1,28. Постоянство температуры стенки обеспечивалось регулированием подводимой электрической мощности к калориметру, несмотря на изменение скорости воздуха в указанном интервале. В АВО природного газа всегда ψ > 1, так как температура стенки $T_{ст}$ БРТ больше температуры потока $T_{п}$ воздуха.

Результаты опытов приведены на рис. 1 в логарифмических координатах.

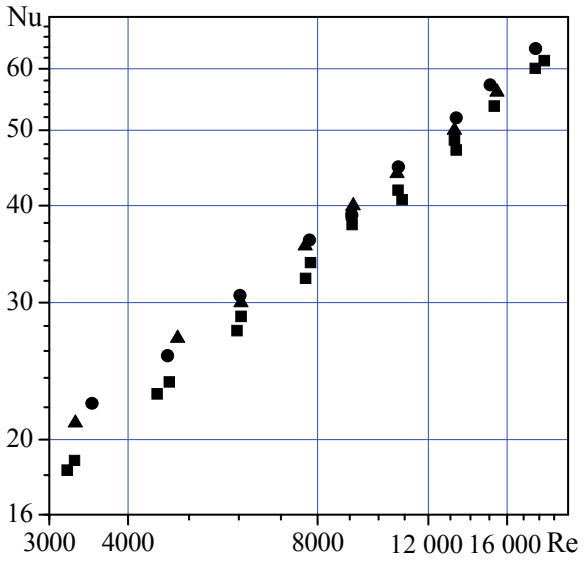


Рис. 1. График приведенной теплоотдачи третьего ряда пучка:
■, ●, ▲ – соответственно, температура стенки $t_{ст}$ = 39,5; 70,3; 101°С

Опытами охвачено изменение числа Re = = 3000−19 000, при котором ранее выполненные исследования не проводились. При увеличении температурного фактора ψ от 1,066 до 1,17 (рост $t_{ст}$ от 39,5 до 70,3) приведенная средняя теплоотдача (число Nu при Re = const) снижается в среднем на 5%, но дальнейший рост ψ от 1,17 до 1,28 не оказывает влияния на теплоотдачу, которая при Re = const остается постоянной.

Наглядное представление по количественному влиянию температурного фактора на теплоотдачу ребристого пучка АВО для числа Re = 10^4 можно представить по рис. 2 и 3, построенных в логарифмических координатах по данным рис. 1.

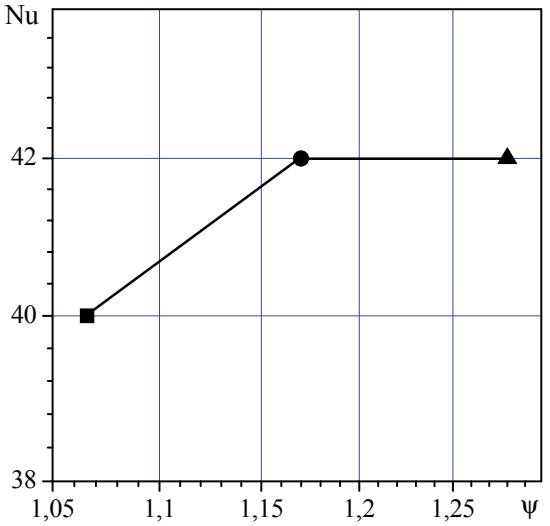


Рис. 2. Зависимость температурного фактора от изменения средней теплоотдачи пучка:
■, ●, ▲ – соответственно, температура стенки $t_{ст}$ = 39,5; 70,3; 101°С

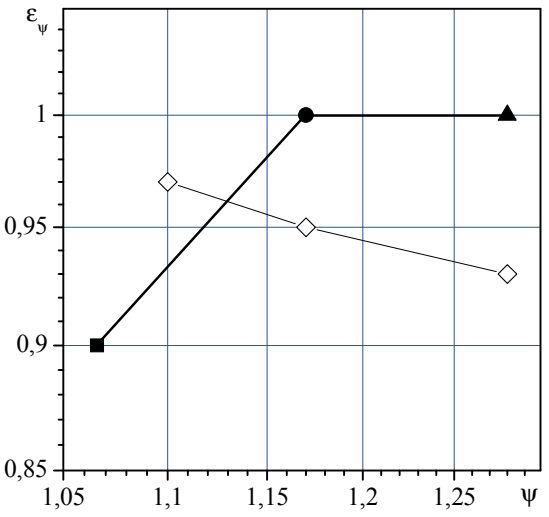


Рис. 3. Поправочный коэффициент к средней приведенной теплоотдаче ребристого пучка АВО:
■, ●, ▲ – соответственно, температура стенки $t_{ст}$ = 39,5; 70,3; 101°С

Из рис. 3 следует, что существует, прежде всего, качественное различие характера изменения поправочного коэффициента ε_ψ в исследованном нами диапазоне ψ с данными [13]. По результатам [13] значение ε_ψ непрерывно

уменьшается в соответствии влияния симплекса $(T_{ст} / T_{п})^{-0,3}$ с ростом ψ. Однако результаты эксперимента противоположны. С ростом ψ от 1,066 до 1,17 теплоотдача повышается на 5%, но последующее увеличение ψ от 1,17 до 1,28 не отражается на теплоотдаче. Это можно объяснить существенным различием в геометрических сравниваемых пучков. В области перекрываемых значений $\psi = 1{,}1-1{,}28$ и Re различие в ε_ψ не превышает 7%.

Заключение. По результатам проведенного исследования разработаны рекомендации по учету влияния температурных условий на коэффициент теплоотдачи от оребрения к воздуху при тепловом расчете АВО для рабочих режимов эксплуатации.

Для пучков АВО в случае расчета конвективного коэффициента теплоотдачи $\alpha_к$ по обобщенному уравнению [1, 2], в котором физические свойства воздуха λ, ν приняты по его средней температуре в пучке, необходимо его пересчитать на приведенный коэффициент теплоотдачи α и в интервале температурного фактора $\psi = 1{,}17-1{,}28$ не следует учитывать его влияние. При $\psi < 1{,}17$ значение α необходимо умножить на величину ε_ψ из рис. 3.

Список литературы

1. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: справочник / под общ. ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. СПб.: Недра, 1996. 512 с.

2. Кунтыш В. Б., Кузнецов Н. М. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения. СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 280 с.

3. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. Справочник. М.: Атомиздат, 1979. 218 с.

4. Юдин В. Ф. Теплообмен поперечнооребренных труб. Л.: Машиностроение, 1982. 189 с.

5. Письменный Е. Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребренных труб. Киев: Альтерпресс, 2004. 244 с.

6. Кутателадзе С. С., Ляховский Д. Н., Пермяков В. А. Моделирование теплоэнергетического оборудования. М; Л.: Энергия, 1986. 351 с.

7. Антуфьев В. М., Белецкий Г. С. Влияние температурного фактора на теплоотдачу трубчатых поверхностей нагрева в поперечном потоке газа // Советское котлотурбостроение. 1948. № 4. С. 1−4.

8. Кузнецов Н. В., Турилин С. И. Влияние температурных условий на теплоотдачу и сопротивление трубчатых поверхностей в поперечном потоке // Изв. ВТИ. 1952. № 11. С. 23−27.

9. Дубровин И. В. Влияние температурного фактора на теплоотдачу // Теплоэнергетика. 1960. № 4. С. 69−74.

10. Ильин Л. Н. Влияние температурных условий на теплоотдачу и сопротивление при течении воздуха в трубе // Советское котлотурбостроение. 1951. № 1. С. 3−7.

11. Мигай В. К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 364 с.

12. Антуфьев В. М., Белецкий Г. С. Теплопередача и аэродинамическое сопротивление трубчатых поверхностей в поперечном потоке. М; Л.: Машгиз, 1948. 207 с.

13. Юдин В. Ф., Тохтарова Л. С. Влияние температурного фактора на теплоотдачу пучков ребристых труб // Наука и техника. 1979. № 1. С. 112−121.

14. Экспериментальное исследование теплообмена, аэродинамического и контактного сопротивления шахматных пучков из труб со спиральными накатными ребрами аппаратов воздушного охлаждения / В. Б. Кунтыш [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2019. № 1. С. 14−19.

References

1. Kuntysh V. B., Bessonnyy A. N. *Osnovy rascheta i proektirovaniya teploobmennikov vozdushnogo okhlazhdeniya* [Basic of calculation and design of air-cooled heat exchangers]. St. Petersburg, Nedra Publ., 1996. 512 p.

2. Kuntysh V. B., Kuznecov N. M. *Teplovoy i aerodinamicheskiy raschety orebrennykh teploobmennikov vozdushnogo okhlazhdeniya* [Thermal and aerodynamic calculations ribbed heat exchangers of air cooling]. St. Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1992. 280 p.

3. Wang H. *Osnovnyye formuly i dannyye po teploobmenu dlya inzhenerov. Spravochnik* [Basic formulas and data on heat transfer for engineer]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979. 218 p.

4. Judin V. F. *Teploobmen poperechnoorebrennykh trub* [Heat exchange is transverse ribbe pipes]. St. Petersburg, Mashinostroeniye Publ., 1982. 189 p.

5. Pis'menyy E. N. *Teploobmen i aerodinamika paketa poperechno-orebrennykh trub* [Heat exchange and aerodynamics of packages is transverse-ribbed tubes]. Kiev, Al'terpress Publ., 2004. 244 p.

6. Kutateladze S. S., Lyakhovsky D. N., Permyakov V. A. *Modelirovaniye teploenergeticheskogo oborudovaniya* [Modeling of heat power equipment]. Moscow; Leningrad, Energy Publ., 1986. 351 p.

7. Antufiev V. M., Beletsky G. S. Influence of the temperature factor on the heat transfer of tubular heating surfaces in transverse gas stream. *Sovetskoye kotloturbostroyeniye* [Soviet boiler turbine construction], 1948, no. 4, pp. 1−4 (In Russian).

8. Kuznetsov N. V., Turilin S. I. Influence of temperature conditions on heat transfer and resistance of tubular surfaces in a transverse flow. *Izvestiya Vsesoyuznogo teplotekhnicheskogo instituta* [Bulletin of the All-Union Thermotechnical Institute], 1952, no. 11, pp. 23−27 (In Russian).

9. Dubrovin I. V. Influence of the temperature factor on heat transfer. *Teploenergetika* [Thermal engineering], 1960, no. 4, pp. 69−74 (In Russian).

10. Ilyin L. N. Influence of temperature conditions on heat transfer and resistance during air flow in tube. *Sovetskoye kotloturbostroyeniye* [Soviet boiler turbine construction], 1951, no. 1, pp. 3−7 (in Russian).

11. Migai V. K. *Modelirovaniye teploobmennogo energeticheskogo oborudovaniya* [Modeling of heat-exchange power equipment]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1987. 364 p.

12. Antufiev V. M., Beletsky G. S. *Teploperedacha i aerodinamicheskoye soprotivleniye trubchatykh poverkhnostey v poperechnom potoke* [Heat transfer and aerodynamic resistance of tubular surfaces in transverse flow]. Moscow; Leningrad, Mashgiz Publ., 1948. 207 p.

13. Yudin V. F., Tokhtarova L. S. Influence of the temperature factor on the heat transfer of bundles of ribbed tubes. *Nauka i tekhnika* [Science and technology], 1979, no. 1, pp. 112−121 (In Russian).

14. Kuntysh V. B., Suhotsky A. B., Farafontov V. N., Dudarev V. V., Sidorik G. S. Experimental study of heat transfer, aerodynamic and contact resistance of chess beams from pipes with spiral knurled fins of air-cooled devices. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2019, no. 1, pp. 14−19 (In Russian).

Информация об авторах

Кунтыш Владимир Борисович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: egit@belstu.by

Сухоцкий Альберт Борисович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: alk2905@mail.ru

Маршалова Галина Сергеевна – кандидат технических наук, ассистент кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: galiana.sidorik@gmail.com

Фарафонтов Валерий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь).

Information about the authors

Kuntysh Vladimir Borisovich – DSc (Engineering), Professor, Professor, the Department of Energy-saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: egit@belstu.by

Sukhotski Al'bert Borisovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Energy-saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alk2905@mail.ru

Marshalova Galina Sergeevna − PhD (Engineering), Assistant lecturer, the Department of Energy-saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: galiana.sidorik@gmail.com

Farafontov Valery Nikolaevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Energy-saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus).

Поступила 15.03.2020

УДК 628.39

В. Е. Левкевич[1], Г. И. Касперов[2], Я. В. Тризнюк[2]
[1] Белорусский национальный технический университет
[2] Белорусский государственный технологический университет

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ХИМИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ

В статье приведены некоторые результаты научных исследований по теме «Разработка алгоритма переноса химических загрязнений в водотоках и водоемах при чрезвычайных ситуациях техногенного характера».

В качестве источников чрезвычайных ситуаций рассматривались: аварии в канализационных системах с массовым выбросом загрязняющих веществ; аварии на очистных сооружениях сточных вод с массовым выбросом загрязняющих веществ; аварии на транспорте с выбросом сильнодействующих ядовитых веществ, а также аварии в местах хранения ядовитых веществ, используемых в сельском хозяйстве. Исходными данными исследований явились опубликованные материалы Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, данные мониторинга поверхностных вод Белгидрометеоцентра, а также результаты собственных полевых и лабораторных исследований.

В статье рассмотрены источники и основные причины химического загрязнения рек Республики Беларусь.

Приводятся результаты лабораторных исследований переноса химических загрязнений в водотоках и водоемах при различных сценариях возникновения и развития источников чрезвычайных ситуаций техногенного характера (разливах, переливах, разрывах трубопроводов, продуктопроводов и т. д.).

В ходе исследований определены качественные показатели процесса переноса химических загрязнений в водотоках и водоемах.

Ключевые слова: авария, водоем, загрязнение, перенос, сброс, чрезвычайные ситуации.

V. Ye. Levkevich[1], G. I. Kasperov[2], J. V. Triznyuk[2]
[1] Belarusian National Technical University
[2] Belarusian State Technological University

LABORATORY TESTS OF CHEMICAL CONTAMINANTS TRANSFER IN WATER BODIES

The article provides several research results on the subject “The Development of the Algorithm of Chemical Contaminants Transfer in Water Flows and Water Reservoirs in Man-Made Emergencies”.

The following sources of emergencies were considered: sewerage systems accidents with massive emission of contaminants; waste water treatment facilities accidents with massive emission of contaminants, transport accidents with emission of extremely toxic substances, accidents in storage sites of poisonous substances used in agriculture.

Analysis input data were the materials published by the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, monitoring data of Belarus Meteorological Centre, field and laboratory tests by the authors.

The article analyses the sources and main causes of chemical contamination of rivers in the Republic of Belarus.

The article provides the results of laboratory tests of chemical contaminants transfer in water flows and water reservoirs with regards to various scenarios of man-made emergencies beginning and development depending on a source (flooding, overflowing, pipes breaks, etc.).

As a part of the research, quality indicators for chemical contaminants transfer in water flows and water reservoirs were determined.

Key words: accident, water reservoirs, contamination, transfer, water discharge/removal, emergencies.

Введение. На территории Беларуси насчитывается 20 781 тыс. рек, более 150 водохранилищ и 1300 прудов. Площадь водосборов рек колеблется в больших пределах: от 50 км² до 12 000 км². Средняя густота речной сети составляет 0,44 км/км². Максимальные значения густоты зафиксированы на севере республики, где на отдельных водосборах она достигает 0,60–0,80 км/км². Минимальные значения (0,23–0,30 км/км²) отмечаются на юге Беларуси [1].

Результаты наблюдений за состоянием рек и водоемов свидетельствуют о том, что качество поверхностных вод в последние годы остается стабильным. Это является следствием проводимой работы по сокращению сброса в водные объекты загрязненных сточных вод, объем которых за последние годы сократился почти в три раза. Однако, несмотря на предпринимаемые меры, содержание в воде загрязняющих веществ (азота аммонийного, азота нитритного, нефтепродуктов и цинка) все еще не отвечает нормативным требованиям [2].

Наряду с поступлением недостаточно очищенных сточных вод существенным источником химического загрязнения поверхностных вод являются аварийные ситуации. Среди главных причин возникновения аварий следует считать: устаревшее оборудование, исчерпавшее ресурс эксплуатации; несвоевременный и некачественный его ремонт; нарушение технологической дисциплины; небрежность обслуживающего персонала и т. д. [3–5].

Для оценки влияния скорости течения и морфометрических характеристик водохранилища, а также свойств загрязнителя на процесс переноса загрязняющих веществ в водоемах были проведены лабораторные исследования.

Основная часть. Анализ многолетних данных показал, что на территории Беларуси официально зарегистрировано более ста техногенных аварий, приведших к химическому загрязнению поверхностных вод республики, в результате которых нанесен экологический и материальный ущерб. Среди рек наибольшую нагрузку, связанную со сбросом сточных вод, испытывают: р. Свислочь ниже Минска, р. Неман ниже Гродно, р. Березина ниже Бобруйска, р. Днепр ниже Могилева и Речицы, р. Западная Двина ниже Новополоцка, р. Припять ниже Мозыря, р. Ясельда ниже Березы, р. Уза ниже Гомеля [6, 7]. Имеющаяся информация показывает, что тенденция роста количества аварийных ситуаций зависит от ряда факторов и условий, что исключает возможности их детального прогнозирования. При этом установлено, что масштабы, в особенности при авариях вблизи водных объектов, имеют большие площади распространения вредных веществ, и, как следствие, наносится значительный ущерб экосистеме страны [8, 9]. Отмечается массовая гибель моллюсков, раков, рыбы, других водных организмов и водной растительности и т. д. Наряду со значительным материальным и экологическим ущербом следует оценивать и социальный ущерб, который включает в себя вред, нанесенный здоровью населения, и ухудшение условий обитания человека.

Наибольшее количество случаев (более 90% от общего числа), сопровождающихся массовым выбросом загрязняющих веществ в водные объекты, приходится на аварии в канализационных системах и на очистных сооружениях сточных вод (рис. 1).

Рис. 1. Доля различных видов аварий, повлекших за собой химическое загрязнение водных объектов

К потенциально опасным источникам химического загрязнения водных объектов следует отнести также автомобильный и железнодорожный транспорт, который перевозит химически опасные вещества. По железным дорогам страны ежемесячно перевозится до 1500 вагонов с взрывоопасными и ядовитыми веществами. На многих предприятиях этот вид транспорта является важнейшим при внутризаводских перевозках. Используются как цистерны вместимостью 40–60 т, так и различные контейнеры и емкости до 0,8 м^3. На территории республики осуществляют перевозку опасных грузов более трех тысяч транспортных предприятий, в том числе автомобильным, железнодорожным и водным транспортом.

Основными причинами аварий на железнодорожном транспорте являются неисправности путей, подвижного состава, средств сигнализации, централизации и блокировки, ошибки диспетчеров, невнимательность и халатность машинистов. Чаще всего происходит сход подвижного состава с рельсов, столкновения, наезды на препятствия на переездах.

Причинами чрезвычайных ситуаций на автомобильном транспорте являются неудовлетворительное техническое состояние дорог и техники, большое количество развязок и пересечений дорог на одном уровне, в том числе и с железными дорогами, возросшее количество автомобильного транспорта, принадлежащего физическим лицам, и т. д.

Особую опасность представляют аварии при транспортировке химически опасных веществ на речном транспорте. В республике ре-

ки судоходны на протяжении 1900 км, что говорит о возможности переноса на большие расстояния химически опасных веществ в случае возникновения аварий. Данный вид аварии представляет собой особую проблему, поскольку место возможной катастрофы с трудом поддается прогнозу. В табл. 1 приведены некоторые станции по выгрузке и отстою сильнодействующих ядовитых веществ (СДЯВ).

Таблица 1

Перечень некоторых станций по выгрузке и отстою СДЯВ

Название станции	Виды работ		Вид вещества
	Выгрузка	Отстой	
Свислочь	+	–	Хлор
Могилев	+	–	Сероуглерод
Брест	+	–	Цианистый водород
Новополоцк	+	–	Аммиак

В то же время за последние годы зарегистрировано лишь несколько случаев аварий на транспорте с выбросом сильнодействующих ядовитых веществ в водные объекты.

Таким образом, ежегодное повторение аварийных ситуаций, сопровождающихся массовым сбросом загрязняющих веществ в водные объекты (принимая во внимание стратегический характер водных ресурсов страны), требует принятия превентивных мер для ограничения их распространения, локализации и последующей ликвидации [10, 11].

Поэтому изучение процесса переноса химических загрязнений в водных объектах дает возможность своевременного принятия управленческих решений по ограничению распространения химического загрязнения, локализации и последующей ликвидации последствий аварии [5, 11].

В рамках исследований по заданию «Разработка алгоритма переноса химических загрязнений в водотоках и водоемах при чрезвычайных ситуациях техногенного характера» были проведены исследования переноса химических загрязнений в водотоках и водоемах при различных сценариях возникновения и развития источников чрезвычайных ситуаций техногенного характера (разливах, переливах, разрывах трубопроводов, продуктопроводов и т. д.). Исследования выполнены на лабораторной установке, которая представляет собой гидравлический лоток шириной 1,07 м и длиной 14,0 м. Непосредственно к лотку примыкает тарировочный бак, с треугольным водосливом, позволяющим изменять расход воды при различных сценариях развития аварийных ситуаций (рис. 2).

Рис. 2. Гидравлический лоток с моделями водохранилищ

В ходе исследований определялись качественные показатели процесса переноса химических загрязнений в водотоках и водоемах при чрезвычайных ситуациях техногенного характера [13–15]:

– распространение химического загрязнителя в зависимости от места возникновения аварии;

– время, за которое происходит распространение химического загрязнителя в водоемах;

– скорость распространения химического загрязнителя в водоемах;

– расход воды, поступающей через треугольный водослив лотка;

– наиболее неблагоприятные сценарии возникновения и развития аварии.

В лотке в соответствии с выбранным масштабом исследований устанавливали пространственные модели искусственных водных объектов (водохранилищ). В качестве объекта исследований был выбран каскад водохранилищ, входящих в состав Вилейско-Минской водной системы. Модели выполняли с устройством водосбросных сооружений в теле плотины. Горизонтальный масштаб модели – 1:1000, вертикальный – 1:100. Данные масштабы выбраны для достижения наиболее максимального геоморфологического подобия моделей с натурными объектами [1, 2]. Маркеры-красители для имитации химических загрязнителей подготавливаются весовым способом и в растворенном виде с помощью химических пипеток вносятся в водный поток.

По данным натурных исследований тестовых водохранилищ [12] на моделях наносили створы для измерения скорости потока с использованием микрокомпьютерного расходомера-скоростемера (рис. 3). Для определения уровня воды устанавливаются мерные рейки.

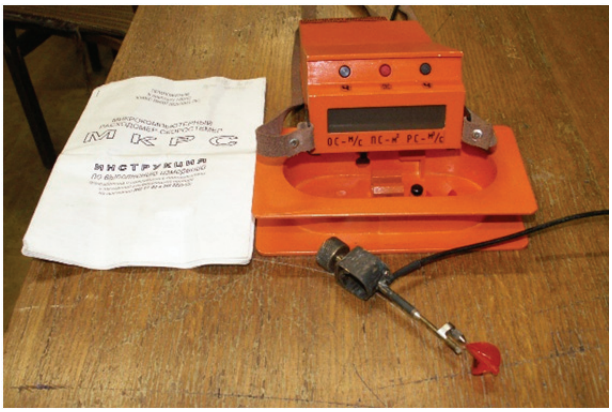


Рис. 3. Микрокомпьютерный расходомер-скоростемер

Обработка результатов экспериментальных данных проводили в соответствии с ГОСТ 8.207. Для определения доверительных интервалов погрешности результата измерения доверительная вероятность P принималась равной 0,95.

Для статистической обработки результатов эксперимента были выполнены следующие действия:

– исключали известные систематические погрешности по результатам наблюдений в соответствии с ГОСТ 11.002;

– находили среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений;

– вычисляли среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений, принимаемое за результат измерения;

– вычисляли оценку среднего квадратичного отклонения от результатов измерения;

– проверяли гипотезу о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению;

– вычисляли доверительные границы случайной погрешности результатов измерения;

– определяли границы не исключенной систематической погрешности результатов измерений;

– вычисляли доверительные границы погрешности результатов измерений.

По результатам лабораторных исследований получены данные (табл. 2), на основании которых разработан алгоритм процесса переноса загрязняющих веществ в водоемах.

Таблица 2

Результаты лабораторных исследований

Номер опыта	Показатели		
№ 4	Время, с	Расстояние, см	Скорость, м/с
	10	50	5
	20	90	4,5
	30	110	3,666667
	60	125	2,083333
	90	140	1,555556
	120	155	1,291667
	150	170	1,133333
	180	180	1
	210	190	0,904762
	240	200	0,833333
	300	260	0,866667

Заключение. В результате проведенных лабораторных исследований установлено, что:

– скорость процесса переноса загрязнителя изменяется в зависимости от длины и ширины водохранилища;

– конфигурация пролива загрязнителя не оказывает какого-либо воздействия на скорость перемещения фронта загрязнения;

– скорость перемещения фронта загрязнения зависит от плотности загрязнителя, скорости течения и морфометрических характеристик водохранилища.

Список литературы

1. Левкевич В. Е. Динамика формирования берегов малых равнинных водохранилищ. Riga: LAP LAMBERT Academic Pablishing, 2018. 149 p.

2. Водные ресурсы – основа устойчивого развития Республики Беларусь / А. Н. Апацкий [и др.] // Международное сотрудничество в решении водно-экологических проблем: материалы III Международного водного форума. Минск, 2006. С. 8–21.

3. Родзиллер И. Д. К вопросу о расчете сточных вод в реках. М.: Стройиздат, 1954. 142 с.

4. Руффель М. А. Метод расчета разбавления сточных вод при санитарной охране водоемов // Гигиена и санитария. 1960. Вып. 4. С. 23–27.

5. Водохранилища Белоруссии: природные особенности и взаимодействие с окружающей средой / В. М. Широков [и др.]. Минск: Университетское, 1991. 178 с.

6. Левкевич В. Е. Натурные исследования течений на малых равнинных водохранилищах // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. 1982. Вып. 12. С. 18–23.

7. Разработка алгоритма переноса химических загрязнений в водотоках и водоемах при чрезвычайных ситуациях техногенного характера: отчет о НИР (заключит.) / КИИ МЧС Респ. Беларусь; рук. темы Г. И. Касперов. Минск, 2010. 144 с. № ГР 20091268.

8. О некоторых вопросах нормирования качества воды рыбохозяйственных водных объектов: постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Бела-

русь и Министерства здравоохранения Республики Беларусь, 8 мая 2007 г., № 43/42 [Электронный ресурс]. URL: http://www.pravo.by/document/index.php?guid=2012&oldDoc=2010-29/2010-29/ (дата обращения: 15.05.2020).

9. Об утверждении инструкции по нормированию сбросов сточных вод в поверхностные водные объекты: постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, 20 янв. 2006 г., № 2 [Электронный ресурс]. URL: http://www.pravo.by/upload/docs/op/W21732141_1497992400.pdf/ (дата обращения: 15.05.2020).

10. Об обращении с отходами: Закон Республики Беларусь, 20 июля 2007 г., № 271-З. [Электронный ресурс]. URL: http://www.pravo.by/upload/docs/op/H11900186_1559941200.pdf / (дата обращения: 19.03.2020).

11. Водный кодекс Республики Беларусь от 30 апреля 2014 г. № 143-З [Электронный ресурс]. URL: http://www.pravo.by/document/?guid=12551&p0=Hk1400149&p1=1/ (дата обращения: 19.03.2020).

12. Колмогоров А. Н., Велапов М. А. О новом варианте гравитационной теории движения взвешенных наносов // Вестн. МГУ. Сер. физ.-мат. и естеств. науки. 1954. № 3. С. 25–29.

13. Караушев А. В. Теория и методы расчета речных наносов. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 216 с.

14. Пааль Л. Л. Инженерные методы расчета формирования качества вод водотоков. Ч. II. Таллин: Высшая школа, 1976. 123 с.

15. Расчет разбавления сточных вод в реках Урала / под ред. В. С. Шахова. Свердловск: ДГТУ, 1976. 157 с.

References

1. Levkevich V. Ye. *Dinamika formirovaniya beregov ravninnykh vodokhranilishch* [Dynamics of Formation of Small Flat Water Bodies Banks]. Riga, LAP LAMBERT Academic Publ., 2018. 149 p.

2. Apatskii A. N., Ablazhey V. P., Kalinin M. Yu., Stankevich A. P. Water Recourses – the Basis of Sustainable Development of the Republic of Belarus. *Mezhdunarodnoye sotrudnichestvo v reshenii vodno-ekologicheskikh problem: materialy III Mezhdunarognogo Vodnogo foruma* [International Cooperation in Dealing with Water And Environment Concerns: Materials of the III International Water Forum]. Minsk, 2006, pp. 8-21 (In Russian).

3. Rodziller I. D. *K voprosu o rashchete stochnykh vod v rekakh* [About the Calculation of Waste Waters in Rivers]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1954. 142 p.

4. Ruffel M. A. Method of Waste Waters Dilution Calculation within Sanitary Control of Water Bodies. *Gigiyena i Sanitariya* [Hygiene and Sanitary], 1960, issue 4, pp. 23–27.

5. Shirokov V. M., Lopuh P. S., Levkevich V. Ye. *Vodokhranilishcha Belorussii: prirodnyye osobennosti i vzaimodeystviye s okruzhayushchey sredoy* [Water Bodies in Belarus: Natural Characteristics and Environment Interaction]. Minsk, Universitetskoye Publ., 1991. 178 p.

6. Levkevich V. Ye. Field Surveys Of Flows in Small Flat Water Bodies. *Vodnoye khozyaystvo i gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo* [Water Management and Hydraulic Engineering], 1982, issue 12, pp. 18–23.

7. *Razrabotka algoritma perenosa khimicheskikh zagryazneniy v vodotokakh i vodoyemakh pri chrezvychaynykh situatsiyakh tekhnogennogo kharaktera* [The Development of the Algorithm of Chemical Contaminants Transfer in Water Flows and Water Reservoirs in Man-Made Emergencies: Research Report (Final). Minsk, 2010, 144 p., no. SR 20091268 (In Russian).

8. About Several Issues of Water Quality Regulation in Fish Industry: Decree of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus and the Ministry of Health of the Republic of Belarus, 8th of May 2007. Available at: http://www.pravo.by/document/index.php?guid=-2012&oldDoc=2010-29/2010-29/ (accessed 15.05.2020).

9. About Issuing the Instruction on Regulation of Waste Waters Discharge to Land Water Bodies: Decree of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, 20th of January 2006. Available at: http://www.pravo.by/upload/docs/op/W21732141_1497992400.pdf/ (accessed 15.05.2020).

10. *Ob obrashchenii s otkhodami: Zakon Resp. Belarus* [Waste Management Law of the Republic of Belarus]. Minsk, 20th of July, 2007, no. 271-Z. Available at: http://www. pravo.by/upload/docs/op/H119-00186_1559941200.pdf/ (accessed 15.05.2020).

11. *Vodnyi kodeks Respubliki Belarus* [Water Code of the Republic of Belarus]. Minsk, 30th of April, 2014, no. 143-Z. Available at: http://www.pravo.by/document/?guid=12551&p0=Hk1400149&p1=1/ (accessed 15.05.2020).

12. Kolmogorov A. N., Velapov M. A. New Version of Gravitation Theory about Suspended Sediments Movement. *Vestnik MGU* [Proceedings of MGU], series Physics, mathematics and natural sciences, 1954, no. 3, pp. 25–29.

13. Karaushev A. V. *Teorii i metody rashcheta nanosov* [Theory and Methods of Fluvial Sediments Evaluation]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1977. 216 p.

14. Paal L. L. *Inzhenernyye metody rashcheta formirovaniya kachestva vod vodotokov* [Engineering Methods of Calculation of Water Flows Formation]. Part II. Tallinn, Vysshaya shkola Publ., 1976. 123 p.

15. *Rashchet razbavleniya stochnykh vod v rekakh Urala* [Calculation of Waste Waters Dilution in Ural Rivers]. Edited by V. S. Shahov. Sverdlovsk, DGTU Publ., 1976. 157 p.

Информация об авторах

Левкевич Виктор Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения. Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 1, Республика Беларусь). E-mail: eco2014@tut.by

Касперов Георгий Иванович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной графики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: borki1959@mail.ru

Тризнюк Яна Вячеславовна – студентка. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: yana_triznyuk@mail.ru

Information about the authors

Levkevich Viktor Yevgen'yevich – DSc (Engineering), Professor, Professor, the Department of Water Supply and Drainage. Belarusian National Technical University (65-1, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: eco2014@tut.by

Kasperov Georgiy Ivanovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Engineering Drawing. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: borki1959@mail.ru

Triznyuk Jana Vyacheslavovna – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yana_triznyuk@mail.ru

Поступила 10.03.2020

УДК 537.525.7:621.762

С. С. Карпович[1], С. И. Карпович[2]
[1]Филиал БНТУ «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики БНТУ»
[2]Белорусский государственный технологический университет

РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗАТОЧКИ ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Заточка лезвийного инструмента – периодически повторяемая операция на протяжении всего времени его эксплуатации. Качество проведения этой операции определяет его ресурс и эффективность всего технологического процесса в целом. Целью работы является изучение возможности минимизировать объем удаляемого инструментального материала в процессе заточки. Проблема имеет практическое значение в связи с тенденцией применения все более дорогих инструментальных материалов.

В статье приведена методика количественной оценки эффективности заточки дереворежущего инструмента в зависимости от характера затупления. Методика расчета заключается в определении минимального объема снимаемого материала, и минимизации объема затрат при проведении операции для разных схем заточки – по задней или по передней и задней поверхностям. Методика оценки схем заточки инструмента позволяет расчетным путем определить эффективность выбора схем заточки (по передней, по задней, или по двум поверхностям одновременно). Расчетным путем доказана целесообразность заточки лезвийного инструмента по двум поверхностям – передней и задней. При этом уменьшается объем снимаемого припуска, расход абразивного инструмента и в целом повышается эффективность всей операции. При рассматриваемых в статье линейных и угловых параметрах заточка по двум поверхностям является более экономной операцией по минимизации сечения снимаемого припуска в 1,38 раза. Заточка инструмента только по задней поверхности уменьшает его ресурс в 1,6 раза.

Ключевые слова: лезвия, резцы, заточка, резание, древесина, оптимизация.

S. S. Karpovich[1], S. I. Karpovich[2]
[1]Branch of the BNTU “Institute for Advanced Studies and Retraining for New Areas of Engineering, Technology and Economy BNTU”
[2]Belarusian State Technological University

CALCULATION METHOD FOR DETERMINING OPTIMAL PARAMETERS FOR SHARPENING WOOD-CUTTING TOOLS

Sharpening a blade tool is a periodically repeated operation throughout the entire time of its operation. The quality of this operation determines its resource, the quality of products, their cost and the efficiency of the entire process as a whole. The purpose of the article is to study the possibility of minimizing the volume of removed tool material in the process of sharpening blade woodworking tools. The problem is relevant and has practical significance in connection with the trend of using increasingly expensive tool materials.

The article presents a method for quantifying the effectiveness of sharpening a wood-cutting tool, depending on the nature of blunting and the applied sharpening angle. The method of calculation is to determine the optimal amount of material, in which a target function of the optimization is to minimize the cost of the tools instrumental in the re-sharpening tool on the front and back surface of the cutting element with the given geometrical parameters.The feasibility of sharpening the blade tool on two surfaces – the front and back-was proved by calculation. The feasibility of sharpening the blade tool on two surfaces-the front and back – has been proved by calculation. This reduces the amount of allowance to be removed, the consumption of the abrasive tool, and generally increases the efficiency of the entire operation. With the linear and angular parameters considered in the article, sharpening on two surfaces is a more economical operation to minimize the cross section of the removed allowance by 1.38 times. Sharpening the tool only on the back surface reduces its resource by 1.6 times.

Key words: blades, cutters, grinding, cutting, wood, optimization.

Введение. Формирование режущих элементов инструмента можно разделить на несколько этапов: первичное получение рабочего клина, применение упрочняющих технологий и периодическое восстановление геометрических параметров режущего клина путем

заточки и доводки абразивным инструментом [1].

Новым направлением в повышении стойкости дереворежущего инструмента является применение сверхтвердых инструментальных материалов [2–4].

Обобщающим показателем эффективности, практической ценности инструмента является его стойкость, которая во многом зависит от качества проведения заключительной операции – заточки. Учитывая, что эта операция осуществляется многократно за время эксплуатации инструмента, следует ожидать существенного суммарного эффекта от повышения качества проведения этой операции.

Новые возможности в технологии обработки материалов резанием связаны с появлением сверхтвердых, инструментальных материалов (СТМ), с нанесением на рабочую поверхность инструмента многослойных износостойких покрытий [5, 6]. Такой инструмент имеет большую стоимость, и актуальными являются вопросы его рационального использования, в том числе и выбора оптимальной схемы заточки.

Заточку подразделяют на черновую, которую проводят после формирования режущего венца, и чистовую – для восстановления геометрических параметров зубьев после их затупления в процессе работы. На заводах – потребителях инструмента – более часто проводят чистовую заточку, остановимся на анализе этой операции [7].

Заточка по передней поверхности режущего клина ограничивает перемещение абразивного круга.

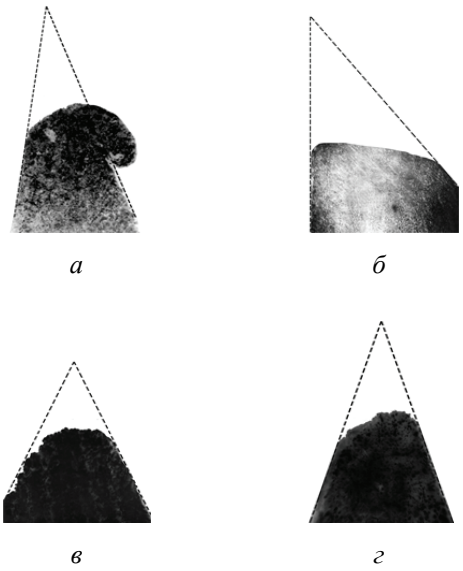
Заточка по задней поверхности связана с максимальным объемом удаляемого инструментального материала и расходом шлифовального круга, но более технологична в сравнении с первой схемой.

Заточка по двум поверхностям – передней и задней – более эффективна по расходу материалов и сохранению профиля режущих элементов. В этом случае встает вопрос о величине припуска, снимаемого по передней и задней поверхностям.

Для плющеных зубьев рекомендуемое соотношение толщин сошлифовываемых слоев по задней и передней граням принимают равным двум [8]. Для разведенных зубьев такие конкретные рекомендации отсутствуют.

В первоначальный период работы инструмента происходит интенсивное затупление лезвия за счет удаления заусенца и дефектного микрослоя, образовавшегося при заточке [9–11].

При обработке нетеплопроводных материалов характерен износ с округлением режущей кромки. На рис. 1 приведены характерные виды износа лезвия дереворежущего инструмента.



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Характерные виды износа дереворежущего инструмента:
а – резец из стали 9Х5ВФ, HRC = 45;
б – резец из стали У12;
в – резец из твердого сплава ВК 15;
г – резец из стали Р18, HRC = 62

Если рациональность схемы заточки оценивать по минимизации потерь инструментального материала при ее проведении, встает практический вопрос, как ее осуществлять по передней, задней поверхностям или в каком соотношении снимать слой материала с передней и задней поверхностей.

Основная часть. Для расчета эффективности разных схем заточки лезвийного инструмента разработана методика количественной оценки этих операций. В основе методики положено соотношение сечений снимаемого припуска при заточке только по задней поверхности к суммарной площади снимаемого припуска при заточке по передней и задней поверхностям. Для упрощения расчета примем сечение режущей пластинки в форме ромба. Схема заточки представлена на рис. 2.

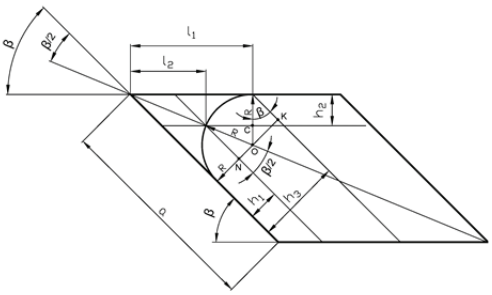


Рис. 2. Возможные схемы заточки лезвийного инструмента

Согласно рис. 2 снимаемый припуск при заточке только по задней поверхности будет равняться

$$h_3 = R + OK,$$

где $OK = R\sin\beta$.

Тогда $h_3 = R + R\sin\beta$.

При заточке одновременно по двум поверхностям снимаемый припуск по задней поверхности h_1 равняется

$$h_1 = R - NO,$$

где $NO = R\sin\frac{\beta}{2}$.

Тогда $h_1 = R - R\sin\frac{\beta}{2}$.

А снимаемый припуск по передней поверхности h_2 равняется

$$h_2 = R - OC;\ \frac{OC}{R} = \sin\beta;\ OC = R\sin\frac{\beta}{2}.$$

Тогда $h_2 = R - R\sin\frac{\beta}{2}$.

Отсюда следует, что если вершина режущей кромки находится на биссектрисе угла заточки, то отношение припусков, снимаемых при заточке по передней и задней плоскостям равняется

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{R - R\sin\frac{\beta}{2}}{R - R\sin\frac{\beta}{2}} = 1,$$

т. е. одинаковое.

Площадь сечения снимаемого слоя h_3 при заточке только по задней поверхности

$$S_3 = ah_3 = a(R + R\sin\beta).$$

Площадь сечения снимаемого слоя h_2 при заточке по передней поверхности

$$S_2 = ah_2 = a(R - R\sin\beta).$$

Площадь сечения снимаемого слоя h_1 при заточке по задней поверхности

$$S_1 = ah_1 = a(R - R\sin\beta).$$

Соотношение сечения снимаемого слоя при заточке только по задней поверхности к суммарной поверхности при заточке по двум поверхностям, передней и задней, равняется

$$\frac{S_3}{S_1 + S_2} = \frac{a(R + R\sin\beta)}{a(R - R\sin\frac{\beta}{2} + a(R - R\sin\frac{\beta}{2})} = \frac{1 + \sin\beta}{2(1 - \sin\frac{\beta}{2})}.$$

При угле режущего клина $\beta = 45°$ получим числовое значение

$$\frac{1 + 0,707}{2(1 - 0,383)} = \frac{1,707}{1,234} = 1,38.$$

Расчет показывает, что заточка по двум поверхностям – более экономная операция по минимизации сечения снимаемого припуска в 1,38 раза. Дополнительным преимуществом является увеличение количества переточек.

При заточке только по задней поверхности при снятии припусков h_3 размер по передней поверхности уменьшается на величину l_1.

$$\frac{l_1}{R} = \mathrm{tg}\frac{\beta}{2};\ l_1 = R\mathrm{tg}\cdot\frac{\beta}{2}.$$

При заточке по передней и задней поверхностям при снятии припуска h_1 и h_2 размер по передней поверхности уменьшается на величину l_2.

$$\frac{l_2}{h_2} = \mathrm{tg}\frac{\beta}{2};\ l_2 = h_2 \cdot \mathrm{tg}\frac{\beta}{2}.$$

Подставив значение $h_2 = R(1 - \sin\frac{\beta}{2})$, получим

$$l_2 = R(1 - \sin\frac{\beta}{2} \cdot \mathrm{tg}\frac{\beta}{2}.$$

Тогда при угле заточки $\beta = 45°$ получим отношение

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{R \cdot \mathrm{tg}\frac{\beta}{2}}{R(1 - \sin\frac{\beta}{2})\mathrm{tg}\frac{\beta}{2}} = \frac{1}{1 - \sin\frac{\beta}{2}} = \frac{1}{1 - 0,38} = 1,621.$$

При заточке режущего клина по передней и задней поверхностям режущего клина количество переточек увеличивается в 1,6 раза.

Анализ уравнений показывает, что при заточке лезвийного инструмента объем снимаемого материала зависит только от угла заострения режущего клина. Эта зависимость приведена на рис. 3.

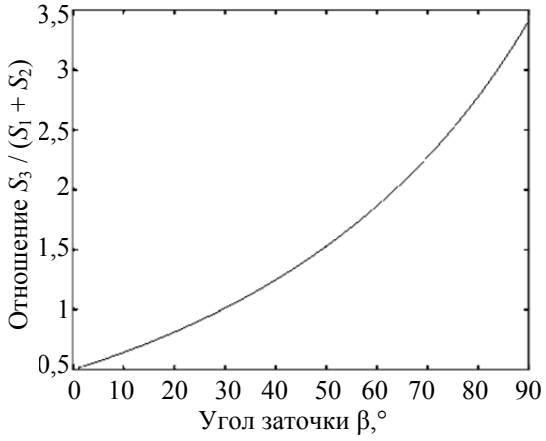


Рис. 3. Влияние углов заточки на соотношение площадей снимаемого припуска

На рис. 3 показана зависимость соотношения площадей снимаемого припуска только по задней поверхности к суммарной площади при заточке по двум поверхностям – задней и передней – в зависимости от угла заточки β. Это соотношение рассчитано по следующей программе в пакете Matlab:

```
clear, clc, clf;
for i=1:90
    betta(i)=pi*i/180;

Krit(i)=(1+sin(betta(i)))/(2*(1-
sin(betta(i)/2)));
end
plot(Krit)
xlabel('угол заточки b,°')
ylabel('Отношение S3/(S1+S2)');
alfa=pi*45/180
(1+sin(alfa))/(2*(1-sin(alfa/2)))
```

Зависимость указывает, что с увеличением угла заточки инструмента по двум поверхностям (задней и передней) эффективность такой схемы заточки возрастает.

Объем снимаемого припуска при заточке только по задней поверхности в 1,33 раза больше, чем при заточке по двум поверхностям – передней и задней. Количество переточек инструмента только по задней поверхности уменьшает его ресурс в 1,6 раза.

Стоимость современных СТМ выше других инструментальных материалов, поэтому при заточке такого инструмента становится экономически выгодным минимизировать отходы инструментального материала при выполнении этой операции и расход абразивного инструмента. При обработке древесины преимущественным является износ с округлением режущей кромки [12], и в дальнейших расчетах примем, что режущая пластинка в сечении представляет собой параллелограмм со сторонами a и b и углом заострения β. При затуплении рабочую поверхность резца в сечении можно представить как часть окружности радиуса R. В этом случае задача оптимизации может быть представлена как поиск такой точки, лежащей на окружности затупления, чтобы оставшаяся после заточки резца площадь была максимальной. На рис. 4 показана геометрическая интерпретация задачи нахождения оптимальных параметров заточки с минимизацией потерь инструментального материала.

При этом центр окружности относительно вершины, подвергшейся затуплению, будет смещен по горизонтали на x_0 и по вертикали на y_0:

$$x_0 = \frac{R}{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)}, \qquad (1)$$

$$y_0 = R. \qquad (2)$$

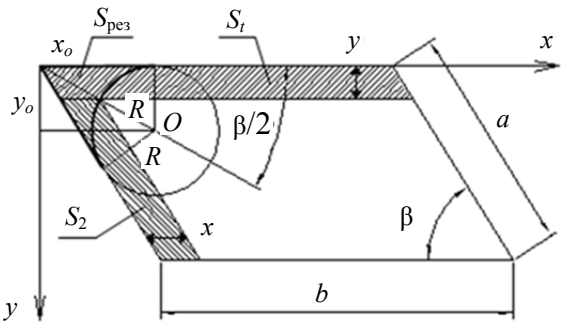


Рис. 4. Определение координат центра окружности и уравнения поверхности затупления режущего клина инструмента

Координаты точек, лежащих на поверхности затупления резца, можно найти из уравнения окружности:

$$\left(x - \frac{R}{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)}\right)^2 + (y - R)^2 = R^2. \qquad (3)$$

Из уравнения (3) можно выразить переменную x:

$$x = \frac{R}{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} - \sqrt{2Ry - y^2}. \qquad (4)$$

Тогда площадь сечения снимаемого материала при заточке будет равна

$$S = S_1 + S_2 =$$

$$= by + \left(\frac{R}{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} - \sqrt{2Ry - y^2} - \frac{y}{\operatorname{tg}(\beta)}\right) \times$$

$$\times \left(a\sin(\beta) - y\right), \qquad (5)$$

где S – площадь снятого материала, мм^2; S_1 – площадь снятого материала по оси x, мм^2; S_2 – площадь снятого материала по оси y, мм^2; b – сторона параллелограмма геометрической интерпретации резца по оси x, мм; y – координата точки на поверхности затупления радиуса R, мм; R – радиус затупления резца, мм; β – угол заострения резца, радианы; a – сторона параллелограмма геометрической интерпретации резца по оси y, мм.

Переменная y в уравнении (5) изменяется в пределах $y \in \left[0; R\left(1 + \cos(\beta)\right)\right]$.

Минимизация снимаемой площади S приведет к такому же решению, что и задача макси-

мизации объема материала, остающегося после заточки резца.

Минимуму функции (5) соответствует уравнение

$$\frac{\partial S}{\partial y} = b + \left(a\sin(\beta) - y\right)\times$$
$$\times\left(\frac{y-R}{\sqrt{2Ry-y^2}} - \frac{1}{\operatorname{tg}(\beta)}\right) -$$
$$-\frac{R}{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} + \sqrt{2Ry-y^2} + \frac{y}{\operatorname{tg}(\beta)} = 0. \qquad (6)$$

Решению уравнения (6) в общем виде препятствует то, что уравнение является полиномом четвертой степени. В связи с этим нахождение неизвестных x и y более целесообразно осуществить с привлечением ЭВМ в какомлибо математическом пакете.

При оптимизации нахождения допустимого радиуса затупления R, при котором необходима перезаточка инструмента, можно воспользоваться подходом, аналогичным решению задачи оптимизации количества снимаемого материала. В этом случае необходимо ввести дополнительный критерий, характеризующий эффективность работы режущего элемента по отношению к работе по подготовке и заточке инструмента.

Рассмотрим сечение режущей пластинки. В случае затупления резца по радиусу R площадь материала, диспергированного в процессе затупления резца, равна

$$S_{\text{рез}} = \frac{R^2}{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} - \frac{(\pi-\beta)\cdot R^2}{2}, \qquad (7)$$

где $S_{\text{рез}}$ – площадь материала, теряемого в процессе затупления.

Площадь материала, снимаемого при заточке материала, равна разнице между площадью S в уравнении (5) и величиной $S_{\text{рез}}$ в формуле (7):

$$S_{\text{зат}} = S - S_{\text{рез}}, \qquad (8)$$

где $S_{\text{зат}}$ – площадь материала, теряемого в процессе заточки.

Тогда критерий эффективности I_1, равный отношению снимаемой площади при заточке к площади затупления, равен

$$I_1 = \frac{S_{\text{зат}}}{S_{\text{рез}}} = \frac{S - S_{\text{рез}}}{S_{\text{рез}}} = \frac{S}{S_{\text{рез}}} - 1. \qquad (9)$$

Опустив константу, критерий можно упростить:

$$I_2 = \frac{S}{S_{\text{рез}}} =$$
$$= \frac{by + \left(\dfrac{R}{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} - \sqrt{2Ry-y^2} - \dfrac{y}{\operatorname{tg}(\beta)}\right)}{\dfrac{R^2}{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} - \dfrac{(\pi-\beta)R^2}{2}} \times$$
$$\times \frac{\sin(\beta) - y}{\dfrac{R^2}{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} - \dfrac{(\pi-\beta)R^2}{2}}. \qquad (10)$$

С точки зрения максимизации объема удаляемого инструментального материала при заточке критерий I_2 должен быть минимален. Минимуму функции (10) соответствует уравнение

$$\frac{\partial I_2}{\partial R} = \left(\frac{1}{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} - \frac{y}{\sqrt{2Ry-y^2}}\right)\times$$
$$\times\frac{a\sin(\beta) - y}{\dfrac{R^2}{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} - \dfrac{R^2}{2}(\pi-\beta)} -$$
$$-\left(\frac{2R}{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} - (\pi-\beta)R\right)\times$$
$$\times\frac{by + \left(\dfrac{R}{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} - \sqrt{2Ry-y^2} - \dfrac{y}{\operatorname{tg}(\beta)}\right)}{\left(\dfrac{R^2}{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} - \dfrac{R^2}{2}(\pi-\beta)\right)^2}\times$$
$$\times\frac{a\sin(\beta) - y}{\left(\dfrac{R^2}{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} - \dfrac{R^2}{2}(\pi-\beta)\right)^2} = 0. \qquad (11)$$

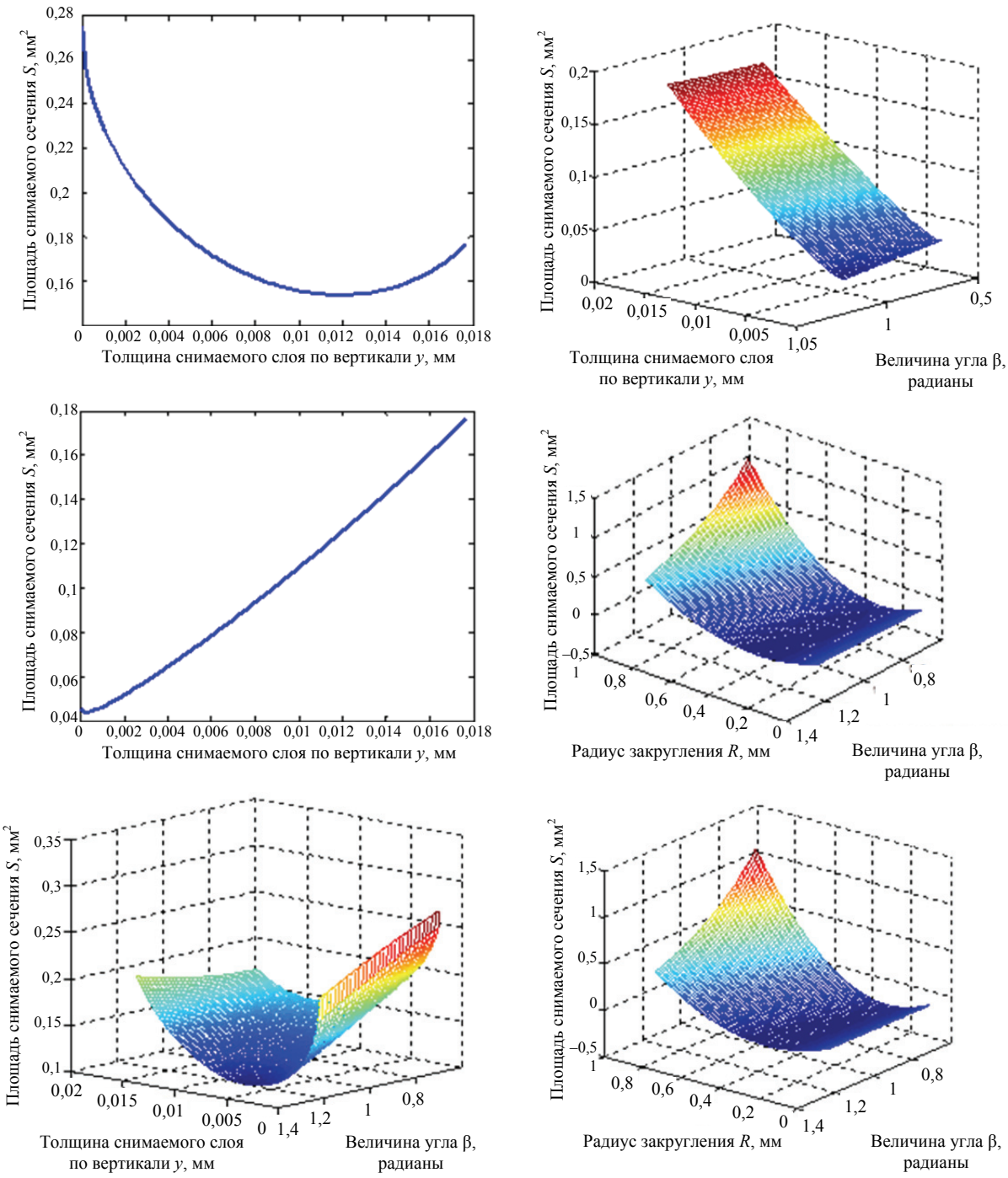


Рис. 5. Зависимости площади снимаемого материала от величин y, β, R

Таким образом, совместное решение уравнений (6) и (11) позволяет найти радиус затупления R, при котором необходимо производить операцию заточки.

Составлен код для математического пакета Matlab, обеспечивающий нахождение координат по горизонтальной x и вертикальной y осям, соответствующих минимальному расходу снимаемого материала при заточке инструмента в зависимости от радиуса затупления, размеров режущей части и угла заострения. Решение может быть представлено в графическом виде (рис. 5).

Предложенная методика определения эффективности схемы заточки лезвийного инструмента позволяет применять количественный критерий для оценки этой операции. В основе количественного критерия лежит отношение сечения снимаемого припуска при заточке режущего клина только по задней поверхности к суммарной площади сечения снимаемого припуска при заточке по задней и передней поверхностям. Чем больше значение этого параметра, тем меньше объем снимаемого материала при заточке и расход абразивного инструмента.

Заключение. Разработана методика количественной оценки эффективности разных схем заточки лезвийного инструмента. Метод основан на определении минимального объема снимаемого инструментального материала при проведении этой операции. Методика оценки схем заточки инструмента позволяет расчетным путем определить эффективность выбора схем заточки (по передней, по задней, или по двум поверхностям одновременно). По соотношению объемов снимаемого припуска более эффективной является заточка режущего клина по передней и задней поверхностям. Заточка по задней и передней поверхностям увеличивает ресурс инструмента в 1,6 раза.

Список литературы

1. Ефремов В. Д., Ящерицын П. И. Технологическое обеспечение качества рабочих кромок инструмента и деталей. Минск: БАТУ, 1997. 251 с.

2. Бакучава Г. В. Применение сверхтвердых материалов в дереворежущем инструменте // Деревообрабатывающая промышленность. 1978. № 8. С. 3–4.

3. Моисеев А. В., Соболев Л. Г. Новые сверхтвердые инструментальные материалы // Деревообрабатывающая промышленность. 1973. № 8. С. 4–6.

4. Johnston J. C. Tooth side clearance requirements for high precision // Eastern Forest Products Laboratory, Environment Canadian Forestry Service. 1974. No. 9. P. 10.

5. Вершина А. К., Агеев А. В. Ионно-плазменные защитно-декоративные покрытия. Гомель: ИММСНАНБ, 2001. 172 с.

6. Мацевитый В. М. Покрытия для режущих инструментов. Х.: Вища школа. Изд-во при Харьк. Университете, 1987. 128 с.

7. Хасдан С. М., Скворцов П. В. Совершенствование конструкций дереворежущих инструментов, методов их подготовки и эксплуатации // Сб. тезисов докладов Всесоюзной конференции. Л., 1973. С. 3–8.

8. Стахиев Ю. М. Работоспособность плоских круглых пил. М.: Лесная промышленность, 1989. 380 с.

9. Клубков А. П., Макаревич С. С., Рудак П. В. Теоретические представления о процессе излома кончика лезвия резца в начальный период работы // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2005. Вып. XIII. С. 208–212.

10. Krilov A. Non destructive method for continuous saw tooth wear assessment // Holz Rohund werkst. 1979. No. 9. P. 353–358.

11. Моисеев А. В. Комплексные исследования явлений, вызывающих износ дереворежущего инструмента // Механическая технология древесины. 1974. Вып. 4. С. 126–135.

12. Клубков А. П., Войтеховский Б. В. Критерии затупления дереворежущего инструмента при фрезеровании древесины и древесных материалов // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2007. Вып. XV. С. 222–224.

References

1. Efremov V. D., Yashcheritsyn P. I. *Tekhnologicheskoye obespecheniye kachestva rabochikh kromok instrumenta i detaley* [Technological quality assurance of the working edges of the tool and parts]. Minsk, BATU Publ., 1997. 251 p.

2. Bakuchava G. V. The use of superhard materials in the wood processing in-tool. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Woodworking industry], 1978, no. 8, pp. 3–4 (In Russian).

3. Moiseev A. V., Sobolev L. G. New superhard tool materials. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Woodworking industry], 1973, no. 8, pp. 4–6 (In Russian).

4. Johnston J. C. Tooth side clearance requirements for high precision. *Eastern Forest Products, Laboratory, Environment Canadian Forestry Service*, 1974, no. 9, p. 10.

5. Vershina A. K., Ageev A. V. *Ionno-plazmennyye zashchitno-dekorativnyye pokrytiya* [Ion-plasma protective and decorative coatings]. Gomel', HIMSNAB Publ., 2001. 172 p.

6. Matsevityy V. M. *Pokrytiya dlya rezhushchikh instrumentov* [Coatings for cutting tools]. Khar'kov, Vishcha shkola. Izdatel'stvo pri Khar'kovskov Universitete Publ., 1987. 128 p.

7. Hasdan S. M., Skvortsov P. V. Improvement of designs of wood-cutting tools, methods of their preparation and operation. *Sbornik tezisov dokladov Vsesoyuznoy konferentsii* [Collection of abstracts of the all-Union conference]. Leningrad, 1973, pp. 3–8.

8. Staheev J. M. *Rabotosposobnost' ploskikh kruglykh pil* [Workability of flat circular saws]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 380 p.

9. Klubkov A. P., Makarevich S. S., Rudak P. V. Theoretical ideas about the process of breaking the tip of the cutter blade in the initial period of work. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forestry and Woodworking Industry, 2005, issue XIII, pp. 208–212 (In Russian).

10. Krilo A. Non destructive method for continuous saw tooth wear assessment. *Holz Rohund werkst*, 1979, no. 9, pp. 353–358.

11. Moiseev A. V. Complex studies of phenomena that cause wear of wood-cutting tools. *Mekhanicheskaya tekhnologiya drevesiny* [Mechanical technology of wood], 1974, issue 4, pp. 126–135 (In Russian).

12. Klubkov A. P., Voytsekhovskiy B. V. Criteria for blunting wood-cutting tools when milling wood and wood materials. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forestry and Woodworking Industry, 2007, issue XV, pp. 222–224 (In Russian).

Информация об авторах

Карпович Сергей Семенович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Инновационные процессы». Филиал БНТУ «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики БНТУ» (220107, г. Минск, пр-т Партизанский, 77, Республика Беларусь). E-mail: KarpovichSI@belstu.by

Карпович Семен Иванович – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры материаловедения и технологии металлов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: KarpovichSI@belstu.by

Information about the authors

Karpovich Sergey Semenovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department “Innovation process”. Branch of the BNTU “Institute for Advanced Studies and Retraining for New Areas of Engineering, Technology and Economy BNTU” (77, Partizansky Ave., 220107, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: KarpovichSI@belstu.by

Karpovich Semyon Ivanovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, the Department of Material Science and Metal Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: KarpovichSI@belstu.by

Поступила 07.03.2020

УДК 621.9.02

В. Б. Левитан[1], С. Е. Бельский[2], М. Н. Пищов[2],
А. В. Вергейчик[2], К. В. Пивоварчик[2]
[1]ЧУП «Сталекс»
[2]Белорусский государственный технологический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОМБИНИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА

Разработка и внедрение в производство ресурсосберегающих технологических процессов изготовления инструментальной оснастки является одной из актуальных задач машиностроения.

Важным фактором повышения эффективности металлообрабатывающих процессов является улучшение использования дефицитных инструментальных материалов. Проанализированы существующие технологические процессы сварки и термической обработки комбинированного инструмента, рассмотрены особенности термической обработки стали Р6М5, используемой для изготовления режущей части.

Рассмотрено влияние технологии сварки и термической обработки комбинированного инструмента на прочность сварного шва. Приведены сведения о применяемой оснастке и схеме испытаний соединения в условиях изгиба. Изучены твердость и прочность образцов из быстрорежущей и конструкционных частей инструмента при различных схемах нагрева в условиях сварки трением и плавлением.

На основании анализа большого объема экспериментального материала показано, что наибольшая прочность сварного шва достигается при использовании конструктивной части из стали 40Х и сварке трением при нагреве обеих частей инструмента с переходом сварного шва на диаметр образца, а также при нагреве только быстрорежущей части с переходом шва на диаметр.

Ключевые слова: сварка, инструмент, быстрорежущая сталь, прочность, твердость, термическая обработка.

V. B. Levitan[1], S. Ye. Belsky[2], M. N. Pishchov[2],
A. V. Vergeichik[2], K. V. Pivavarchyk[2]
[1]Private enterprise “Staleks”
[2]Belarusian State Technological University

RESEARCH OF STRENGTH OF WELDED COMPOUNDS OF COMBINED TOOL

The development and the introduction of resource-saving technological processes of tool equipment production are ones of the crucial tasks of mechanical engineering.

An important factor in improving efficiency of metal-working processes is the improvement of utilization of scarce tool materials. The existing technological processes of welding and heat treatment of the combined tool are analyzed, the features of heat treatment of steel RBM5 used for the cutting part production are considered.

The impact of welding technology and heat treatment of the combined tool on the weld strength is considered. Information is given for the used equipment and the test scheme of the joint under bending conditions. The hardness and the strength of samples from high-speed and structural parts of the tool were studied under various heating schemes in conditions of friction and melting.

Based on the analysis of a large volume of experimental material, it is shown that the maximum weld strength is achieved by using a structural part of steel 40X and friction welding by heating both parts of the tool with the weld transition to the sample diameter, as well as by heating only the high-speed part with the weld transition to diameter.

Key words: welding, tool, high-speed steel, strength, hardness, heat treatment.

Введение. Разработка и практическая реализация процессов изготовления деталей машин и технологической оснастки при обеспечении их высокого качества является одной из наиболее актуальных задач промышленности. Важным фактором повышения эффективности металлообработки является совершенствование изготовления инструмента из дорогих и дефицитных инструментальных сталей. Получение высокой надежности и долговечности инструмента в условиях интенсификации производства и повышения требований к качеству полу-

чаемых заготовок возможно в результате тщательной отработки конструкции и создания эффективной технологии изготовления инструмента.

В связи с этим актуальна задача совершенствования комбинированного инструмента, составляемого из режущей и конструкционной частей. Обеспечение прочности сварного соединения во многом определяет его надежность и долговечность, что весьма важно для производства, поскольку доля простоев высокопроизводительного оборудования из-за замены или наладки инструмента составляет 20–25%.

Различные исследования по-разному трактуют особенности термической обработки сварного шва [1–8]. Актуальной проблемой является задача выбора технологии термической обработки сварного шва.

Основная часть. В работе исследовали пределы прочности при изгибе на сварных образцах из быстрорежущей и конструкционной частей, прошедших различную термическую обработку. Для материала конструкционной части были использованы стали 40Х либо 45. Быстрорежущая часть изготавливалась из стали Р6М5. Выбор данной стали обусловлен благоприятным сочетанием легирующих элементов, благодаря чему в термообработанном состоянии она имеет структуру мартенсита и мелкодисперсных карбидов, обеспечивающих высокую теплостойкость, твердость и прочность. При этом вязкость данной стали превышает значения, полученные для таких сталей, как Р12 и Р18 [9].

Однако для вольфрамомолибденовых сталей характерны некоторые особенности термообработки, которые необходимо учитывать при изготовлении комбинированного инструмента. Для стали типа Р6М5 характерен рост аустенитного зерна при нагреве даже с незначительным превышением температур нагрева под закалку [10]. С другой стороны, снижение температур уменьшает легированность твердого раствора, что ведет к ухудшению режущих свойств инструмента [11–14]. Значительную роль в обеспечении комплекса свойств данной стали играет также температура и кратность отпусков. В некоторых случаях рекомендуется проводить первый отпуск при температуре 350°С, что обеспечивает повышение твердости и вязкости [10], а также проводить двукратный отпуск вместо трехкратного [14, 16].

В работе приводятся результаты определения предела прочности при изгибе на сварных образцах из быстрорежущей и конструкционной стали, прошедших различную термическую обработку. Диаметр образцов для испытаний составлял 16 мм, длина каждой части – 80 мм. Образцы сваривали двумя видами сварки – трением и оплавлением.

После сварки образцы подвергали изотермическому отжигу по двум вариантам.

1 вариант. Нагрев до 860°С, выдержка 4 ч, затем охлаждение с печью до 750°С, выдержка 4 ч, а затем охлаждение в течение 16 ч до 500°С и далее на воздухе.

2 вариант. Нагрев образцов до 860°С, выдержка 2 ч, затем охлаждение с печью до 720°С, выдержка 4 ч, охлаждение с печью в течение 4 ч и далее на воздухе.

На отожженных образцах снимали грат и производили токарную обработку до диаметра 10,8 мм. После этого производили термическую обработку. Вначале закаливали в масло быстрорежущую часть сварного образца по режиму: подогрев 850°С, окончательный нагрев 1220°С. Предварительный нагрев производили в хлорнатриевой ванне, а окончательный – в хлорбариевой. После закалки быстрорежущей части производили трехкратный отпуск при температуре 560°С по 1 ч. Затем выполняли закалку конструкционной части сваренных образцов. Сталь 40Х закаливали в масле при температуре 860°С, а сталь 45 после нагрева ТВЧ – при температуре 830–850°С на воду. Сталь 40Х отпускали в электропечи при температуре 250°С в течение 2 ч, сталь 45 – в электропечи при температуре 150°С в течение 2 ч.

После выполнения полного цикла термической обработки образцы шлифовали до диаметра 10 мм на бесцентровочно-шлифовальном станке. Испытания механических свойств образцов проводили на десятитонной машине Амслера.

Нагрузку на сварной шов образца передавали через пуансон с радиусом при вершине 20 мм. В качестве опор использовали круглые ролики диаметром 30 мм (рис. 1)

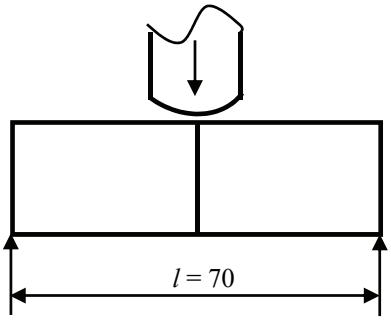


Рис. 1. Схема испытаний на изгиб сварных образцов

Сварной образец устанавливали таким образом, чтобы плоскость сварного шва совпадала с осью приложения нагрузки.

Таблица 1

Прочности режущей и конструкционной частей

Номер образца	Сталь	Разрушающая нагрузка P, Н	$\sigma_{изг}$, МПа	Вид термической обработки
30	Р6М5	19 500	337	Закалка 1220°С + отпуск 560°С, 3 раза по 1 ч
29	Р6М5	18 500	318	
55	Р6М5	21 500	371	
17	Р6М5	18 000	311	
53	40Х	–	469	Закалка 860°С, масло + отпуск 250°С, 2 ч
52	40Х	–	446	
54	40Х	–	458	
43	40Х	–	413	

Предел прочности при изгибе определяли по формуле

$$\sigma_{изг} = \frac{M_{max}}{W};$$

$$M_{max} = \frac{P \cdot l}{4},$$

где P – нагрузка, Н; l – расстояние между опорами, мм.

Момент сопротивления W для круглого сечения определяется по формуле

$$W = \frac{\pi d^3}{32},$$

где d – диаметр образца, мм.

Для межцентрового расстояния между опорами l = 70 предел прочности при изгибе определяется по формуле

$$\sigma = \frac{P \cdot 1783,4}{d^3}.$$

Разрушение всех сварных образцов происходило в зоне сварного шва по быстрорежущей стали.

Половинки сварных образцов испытывали на изгиб для определения истинной прочности стали вне зоны сварного шва. При испытании на изгиб образцов из стали 40Х расстояние между опорами было равным 50 мм.

Результаты испытаний приводятся в табл. 1

Для приготовления микрошлифов использовали половинку сварного образца из конструкционной стали, т. к. на ней остается еще часть быстрорежущей и можно изучать как структуру сварного шва, так и структуру прилегающих ко шву сталей – быстрорежущей и конструктивной (рис. 2).

На половинках поломанных образцов измерили с поверхности твердость по Роквеллу по направлению от излома к противоположному концу образца. Расстояние между уколами алмазного индентора составляло 3 мм.

Приготовление микрошлифов производили в центральной части разрушенного образца в плоскости, проходящей через его продольную ось (рис. 2)

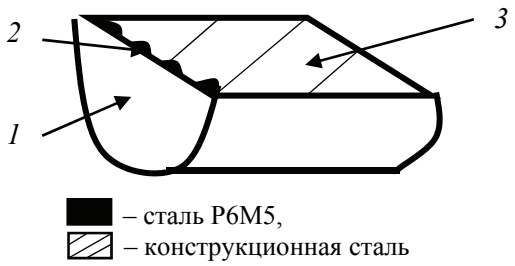
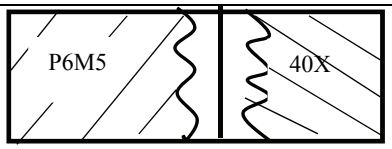
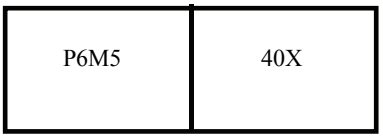


Рис. 2. Схема приготовления микрошлифа для исследования микроструктуры и микротвердости:
1 – излом; *2* – линия шва;
3 – плоскость шлифа

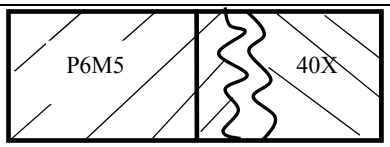
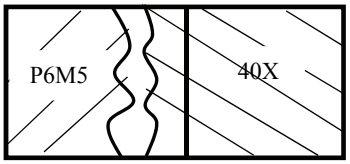
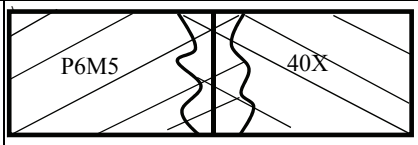
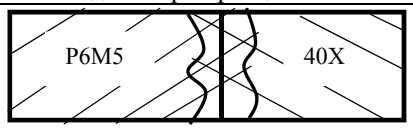
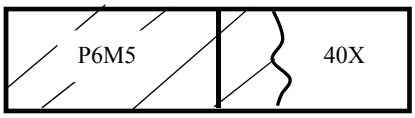
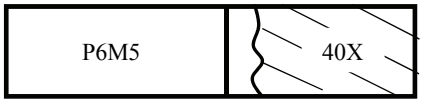
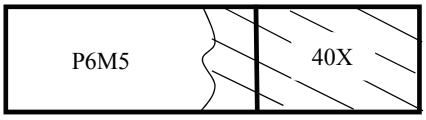
Для разработки оптимальной технологии нагрева при закалке сварных образцов использованы различные схемы граничного нагрева частей инструмента (табл. 2).

Таблица 2

Схема нагрева сварного образца под закалку

Номер образца	Схемы
1	 Нагрев быстрорежущей и конструкционной части производится не доходя до шва на величину диаметра образца
2	 Образцы после отжига, без последующей термообработки

Окончание табл. 2

Номер образца	Схемы
3	 Нагрев быстрорежущей стали с переходом шва на величину диаметра образца, а конструкционной – не доходя шва по диаметру
4	 Быстрорежущая часть нагревается, не доходя шва на диаметр, а конструкционная нагревается с переходом шва на диаметр
5	 Быстрорежущая и конструкционная части нагреваются с переходом сварного шва на диаметр образца
6	 То же, что и 5 вариант, но конструкционная часть закалена без последующего отпуска
7	 Нагрев быстрорежущей части с переходом со шва на диметр. Конструкционная часть в отожженом состоянии
8	 Быстрорежущая часть после отжига, конструкционная нагрета не доходя шва на величину диаметра
9	 Быстрорежущая часть после отжига, конструкционная нагрета с переходом сварного шва на диаметр

После термообработки проведены испытания сварного шва по каждому варианту с определением разрушающей нагрузки, прочности и твердости обеих частей инструмента.

При обработке по первому варианту прочность шва составляла 110–130 МПа при твердости быстрорежущей стали в зоне шва 30–45 HRC. На конструкционной стали, прилегающей к зоне шва, преобладала структура феррата, а на быстрорежущей стали – сорбитообразного перлита с мелкими карбидами. При отсутствии термической обработки (вариант 2) прочность шва также составляла 110–130 МПа, однако твердость быстрорежущей стали была очень низкой (18–20 HRC). Проведение закалки с нагревом быстрорежущей части с переходом шва на величину диаметра образца (вариант 3) обеспечивает необходимую для работы инструмента твердость быстрорежущей стали (60–62 HRC). Прочность шва зависит от материала конструкционной части и при использовании стали 45 составляет 100–120 МПа, а при использовании стали 40Х и сварке плавлением составляет 120–140 МПа, а при сварке трением – 180–190 МПа. Такое различие может быть объяснено тем, что при сварке плавлением в большей мере окисляется зона расплава и имеет место ледебуритная эвтектика на быстрорежущей стали в зоне сварного шва.

При проведении термической обработки шва при использовании стали 40 Х и сварке трением прочность шва несколько ниже, чем по предыдущему варианту (160–180 МПа) и, естественно, значительно ниже твердость быстрорежущей части в зоне шва (38–40 HRC). Следует отметить уменьшение обезуглероживания части шва со стороны конструкционной стали и повышение ее твердости в зоне шва до 25–40 HRC (по сравнению 15–20 HRC по предыдущему варианту). С нагревом быстрорежущей и конструкционной части с переходом сварного шва на диаметр образца (вариант 5) прочность шва при использовании сварки трением составляет 160–170 МПа, а твердость быстрорежущей стали соответствует обычной термообработке (61–62 HRC). При этом значительно возрастает твердость части инструмента из стали 40Х (до 40–50 HRC), отсутствие отпуска после закалки способствует обеспечению твердости стали 40Х до 52–55 HRC при такой прочности шва, как и в предыдущем варианте. Наилучшие результаты по прочности соединения (180–190 МПа) достигаются при нагреве быстрорежущей части с переходом шва на диаметр (вариант 7). Однако очень низкая твердость конструкционной части может вызвать проблемы с последующей эксплуатацией инструмента. Варианты 8, 9, не предусматривающие термической обработки быстрорежущей стали, неприемлемы вследствие ее низкой твердости. Прочность шва составляет в этих случаях 130–160 МПа.

Заключение. Представленными результатами проведенных исследований установлено, что предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ для быстрорежущей части комбинированного инструмента составляет 310–360 МПа, а для части из стали 40Х – 410–460 МПа. Исследование прочности шва показало, что она примерно в два раза ниже прочности отдельных частей инструмента.

Прочность сварного шва при использовании для изготовления конструктивной части стали 40Х значительно выше, чем при применении стали 45. Также показано преимущество сварки трением по сравнению со сваркой плавлением. Термическая обработка сварного шва обязательно должна выполняться с перекрытием его хотя бы на диаметр образца. Наибольшая прочность сварного шва достигается при использовании стали 40Х и сварке трением при нагреве обеих частей инструмента с переходом сварного шва на диаметр образца, а также при нагреве только быстрорежущей части с переходом шва на диаметр. Конструкционная часть в этом случае остается в отожженном состоянии.

При использовании подобных схем предел прочности шва на изгиб $\sigma_{изг}$ составляет порядка 150–180 МПа, а твердость быстрорежущей части – 60–62 HRC.

Список литературы

1. Евтюшкин Ю. А., Егоров В. И., Репин А. В. Рекомендуемые режимы сварки трением концевого инструмента из вольфрамомолибденовой стали Р6М5 с конструкционной сталью 45 на П/Автомате МОД МФ-327 // Известия Томского политехнического института имени С. М. Кирова. Т. 241. 1975. С. 86–89.

2. Милюкова А. М. Структурно-фазовый состав сталей Р6М5 и 40Х после совместной термической обработки // Литье и металлургия. 2013. С. 97–103.

3. Гуревич Ю. Г., Шпак А. Т., Савиных Л. М. Математическое моделирование процесса сварки трением порошковой быстрорежущей стали с конструкционной // Вестник КГУ. 2005. № 2. С. 57–60.

4. Влияние основных параметров процесса сварки трением с перемешиванием на дефектность структуры сварного соединения / О. В. Сизова [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. № 4 (77). С. 19–29.

5. Вилль В. И. Сварка металлов трением. Л.: Машиностроение, 1970. 176 с.

6. Ерохин А. А. Основы сварки плавлением. Л.: Машиностроение, 1973. 199 с.

7. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка в вакууме. Л.: Машиностроение, 1976. 312 с.

8. Хараев Ю. П. Термоциклическая закалка литой быстрорежущей стали // Ползуновский альманах. 2004. № 4. С. 54–55.

9. Геллер Ю. А. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1975. 581 с.

10. Александров Б. Л. Особенности термической обработки быстрорежущей стали Р6М5 // Металловедение и термическая обработка материалов. 1973. № 11. С. 15–17.

11. Особенности горячей обработки стали Р6М5 / А. М. Адаскин [и др.] // Стали и инструменты. 1973. № 7. С. 31–33.

12. Смольников Е. А. Опыт термической обработки быстрорежущих сталей Р6М5, Р6М5К5, Р9М4К8. Металлорежущий и контрольно измерительный инструмент // Экспресс-информация ВИНИТИ М. 1976. Вып. 5. С. 3–9.

13. Адаскин А. М., Анджюс П. А., Бузелис В. И. Причины нестабильности свойств стали Р6М5 // Сталь. 1975. № 7. С. 649–651.

14. Васильев Н. В. Некоторые особенности в микроструктуре режущего инструмента из стали Р6М5 // Пути повышения качества металлорежущего инструмента. 1974. С. 158–161.

15. Бельский С. Е., Тофпенец Р. Л. Структурные факторы эксплуатационной стойкости режущего инструмента. Минск: Наука и техника, 1984. 127 с.

16. О двухкратном отпуске быстрорежущей стали / В. К. Заблоцкий [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. 1973. № 3. С. 54–55.

References

1. Evtyushkin Yu. A., Egorov V. I., Repin A. V. Recommended friction welding of the end tool made of P6M5 tungsten-molybdenum steel with structural steel 45 at the P/Avtomat MOD MF-327. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta imeni S. M. Kirova* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute named after S. M. Kirov], 1975. Vol. 241, pp. 86–89 (In Russian).

2. Milyukova A. M. Structural-phase composition of R6M5 and 40X steels after joint heat treatment. *Lit'ye i metallurgiya* [Casting and Metallurgy], 2013, pp. 97–103 (In Russian).

3. Gurevich Yu. G., Shpak A. T, Savinykh L. M. Mathematical modeling of the friction welding of the powder quick-steel steel from structural. *Vestnik KSU* [Bulletin of KSU], 2005, no. 2, pp. 57–60 (In Russian).

4. Sizova O. V., Kolubaev A. V., Kolubaev E. A., Zaikina A. A., Rubtsov V. E. The influence of the main parameters of the friction stir welding process on the defective structure of the welded joint. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty)* [Metal processing (technology, equipment, tools)], 2017, no. 4 (77), pp. 19–29 (In Russian).

5. Vill' V. I. *Svarka metallov treniyem* [Welding of metals by friction]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1970. 176 p.

6. Erokhin A. A. *Osnovy svarki plavleniyem* [Fundamentals of fusion welding]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1973. 199 p.

7. Kazakov N. F. *Diffuzionnaya svarka v vakuume* [Diffusion welding in vacuum]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1976. 312 p.

8. Kharaev Yu. P. Thermocyclic hardening of cast high-speed steel. *Polzunovskiy al'manakh* [Polzunovsky almanac], 2004, no. 4, pp. 54–55 (In Russian).

9. Geller Yu. A. *Instrumental'nyye stali* [Tool steels]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 581 p.

10. Alexandrov B. L. Features of the heat treatment of high-speed steel R6M5. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka materialov* [Metallurgy and heat treatment of materials], 1973, no. 11, pp. 15–17 (In Russian).

11. Adaskin A. M., Andjus P. A., Buzelis V. I., Makhmudov A. B. Features of hot processing of steel P6M5. *Stali i instrumenty* [Steel and tools], 1973, no. 7, pp. 31–33 (In Russian).

12. Smolnikov E. A. Experience in the heat treatment of high-speed steels R6M5, R6M5K5, R9M4K8. Metal-cutting and measuring instrument. *Ekspress informatsiya VINITI M* [Express information VINITI M], 1976, no. 5, pp. 3–9 (In Russian).

13. Adaskin A. M., Andjus P. A., Buzelis V. I. Causes of instability of the properties of steel P6M5. *Stal'* [Steel], 1975, no. 7, pp. 649–651 (In Russian).

14. Vasiliev N. V. Some features in the microstructure of cutting tools made of P6M5 steel. *Puti povysheniya kachestva metallorezhushchego instrumenta* [Ways to improve the quality of metal cutting tools], 1974, pp. 158–161 (In Russian).

15. Belsky S. E., Tofpenets R. L. *Strukturnyye factory ekspluatatsionnoy stoykosti rezhushchego instrumenta* [Structural factors of the operational resistance of the cutting tool]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1984, 127 p.

16. Zablotsky V. K., Bruchilovsky B. A., Zubov E. S. On the double tempering of high-speed steel. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka materialov* [Metallurgy and heat treatment of metals], 1973, no. 3, pp. 54–55 (In Russian).

Информация об авторах

Левитан Владислав Борисович – инженер-металлург. ЧУП «Сталекс» (220021, г. Минск, пер. Бехтерева, 10, Республика Беларусь). E-mail: vladmet@tut.by

Бельский Сергей Евграфович – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и проектирования технических систем. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dmiptu@belstu.by

Пищов Михаил Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и проектирования технических систем. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Pishchou@belstu.by

Вергейчик Алексей Викторович – студент. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dmiptu@belstu.by

Пивоварчик Карина Васильевна – студент. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dmiptu@belstu.by

Information about the authors

Levitan Vladislav Borisovich – metallurgical engineer. Private enterprise "Staleks" (10, Bekhtereva Lane, 220021, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vladmet@tut.by

Belsky Sergey Yefgrafovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Material Science and Engineering of Technical Systems. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dmiptu@belstu.by

Pishchov Mikhail Nikolayevish – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Material Science and Engineering of Technical Systems. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Pishchou@belstu.by

Vergeichik Aleksey Viktorovich – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). Email: dmiptu@belstu.by

Pivavarchyk Karina Vasilievna – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). Email: dmiptu@belstu.by

Поступила 11.03.2020

УДК 621.934

А. Ф. Аникеенко, Т. А. Машорипова
Белорусский государственный технологический университет

ПРИМЕНЕНИЕ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ В КОНСТРУКЦИИ НОВОГО АДАПТИВНОГО СВЕРЛИЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА

В представленной работе уделено внимание применению упругих элементов в сверлильном инструменте, за счет которых будет независимо регулироваться скорость подачи при сверлении древесины и древесных материалов. Процесс образования в древесине и древесных материалах сквозных и несквозных цилиндрических отверстий с помощью сверл является актуальной задачей в мебельной промышленности. В настоящее время в деревообрабатывающей промышленности для получения качественных поверхностей методом сверления используют высокоточное оборудование с числовым программным управлением, не позволяющим механически изменять скорость подачи инструмента в зависимости от структуры обрабатываемого материала.

Проведен анализ существующего сверлильного инструмента, а также технологий получения отверстий в ламинированной древесностружечной плите. Рассмотрена классификация сверл, их виды и подвиды. Обозначены проблемы и особенности сверления ламинированных плитных материалов. Обоснована необходимость в проектировании сборных сверл особой конструкции. Предложена новая конструкция сборных винтовых сверл, позволяющая механическим путем изменять скорость подачи непосредственно во время обработки ламинированной древесностружечной плиты, тем самым предотвращая появление сколов на поверхности хрупкого слоя (ламината) плиты.

Произведен расчет системы упругих элементов и обоснована целесообразность их использования.

Ключевые слова: сверление, скорость подачи, производительность, качество, пружина.

A. F. Anikeenko, T. A. Mashoripova
Belarusian State Technological University

APPLICATION OF ELASTIC ELEMENTS IN THE DESIGN OF A NEW ADAPTIVE DRILLING TOOL

In this paper, attention is paid to the use of elastic elements in the drilling tool, due to which the feed rate will be independently regulated when drilling wood and wood materials. The process of forming through and non-through cylindrical holes in wood and wood materials using drills is an urgent task in the furniture industry. Currently, in the woodworking industry, high-precision equipment with numerical control is used to obtain high-quality surfaces by drilling, which do not allow to change the tool feed rate mechanically depending on the structure of the material being processed.

The analysis of the existing drilling tools, as well as technologies for obtaining holes in laminated chipboard is carried out. The classification of drills, their types and subspecies is considered. Problems and features of drilling of laminated plate materials are outlined. The necessity of designing precast drills of a special design is justified. A new design of precast screw drills is proposed, which allows to change the feed rate by mechanical means directly during processing of laminated chipboard, thereby preventing the appearance of chips on the surface of the fragile layer (laminate) of the plate.

The calculation of the system of elastic elements is made and the feasibility of their use is justified.

Key words: drilling, feed rate, productivity, quality, spring.

Введение. К настоящему времени проведен ряд исследований по вопросам разработок новых конструкций сверл для обработки древесины и древесных материалов. Однако с созданием новых машин с числовым программным управлением и усовершенствованных конструкций сверлильного инструмента появляется необходимость проведения новых исследований, связанных с рациональным и экономным использованием материальных и энергетических ресурсов, совершенствованием технологических режимов работы оборудования. Это позволяет экономить валютные средства предприятий и, как следствие, осуществлять импортозамещение, повышать конкурентоспособность выпускаемой продукции.

Таким образом, целью данной работы является разработка новой конструкции сверлильного инструмента с применением упругих элементов, а именно пружин с переменным шагом, которые позволят независимо от оборудования изменять скорость подачи.

Основная часть. Существующие сверлильные инструменты, предназначенные для обработки древесины твердых и мягких пород, плитных материалов, имеют один существенный недостаток: они предназначены для обработки только конкретного вида материала на определенных технологических режимах

В основном на деревообрабатывающих предприятиях используются два основных вида сверл, это сверла винтовые с конической заточкой и сверла с центром и подрезателями, спиральные сверла [1].

Сверла с центром и подрезателями винтовые применяют для сверление точных относительно глубоких отверстий в твердой и мягкой древесине, ДСП и МДФ. С помощью центра с оптимизированной геометрией для центрирования достигается точное позиционирование отверстия [2].

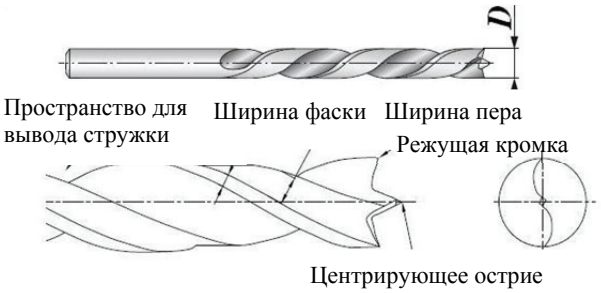


Рис. 1. Центровое сверло

Возникают трудности со сверлами с центром и подрезателями после переточки, т. к. неравномерно заточены кромки и подрезатели находятся не на одном уровне.

Неравномерная заточка происходит из-за того, что затачивают сверла с центром и подрезателями на станках с ручным подводом затачиваемого инструмента.

Немаловажной проблемой сверления ламинированной древесностружечной плиты является образование сколов на поверхности плиты.

На данный момент эту проблему устраняют уменьшением скорости подачи на входе и выходе сверла из отверстия, путем написания алгоритма управления машинами с числовым программным управлением, но при смене инструмента или использовании другого материала необходимо переписывать программу.

Главным критерием качества обработки ламинированных древесно-стружечных плит сверлильным инструментом является отсутствие сколов облицовочного материала недопустимых размеров вдоль кромок полученных отверстий.

В основном детали с облицованной поверхностью являются видимыми и, как следствие, не допускают на поверхности различного вида сколов, вырывов и т. д. [3].

Обеспечение качества поверхности ламинированной поверхности древесностружечной плиты при сверлении отверстий является актуальной задачей, для решения которой разрабатываются новые алгоритмы программного управления станков, применяются современные инструментальные материалы, оптимизируются режимы обработки, а также проектируются новые конструкции сверлильного инструмента.

Существующие методики расчетов технологических режимов резания сверлением требуют усовершенствования. Устаревшая информация и теоретические изыскания, содержащиеся в научной и технической литературе, отсутствие конкретных практических данных не позволяют выполнять достоверные расчеты периода стойкости сверлильного инструмента и потребности в инструменте для выполнения заданного объема работ.

Было спроектировано сверло спиральное сборное. Конструкция данного сверла состоит из хвостовика, цела сверла и одной пружины с переменным шагом. Это сверло позволит, имея систему упругих элементов, с переменным шагом, обрабатывать древесностружечные плиты, в том числе и ламинированные, исключая возможность появления сколов на входе и выходе инструмента. Дело в том, что коэффициент жесткости пружины с переменным шагом возрастает с увеличением нагрузки, что повышает надежность и увеличивает срок ее службы. Применение сверл данного типа в первую очередь позволит улучшить также повысить стойкость сверл за счет уменьшения скорости подачи. Применение такого типа сверл также экономически выгодно, так как закупается только тело сверла, а хвостовики остаются прежние.

Упругий элемент в момент соприкосновения режущей части сверла с обрабатываемым материалом сжимается и тем самым уменьшает скорость подачи. Далее сверло работает как обычное. При увеличении нагрузки на пружину, в момент, когда процесс сверления завершается, чаще расположенные витки начинают смыкаться. При этом число работающих витков уменьшается, и, соответственно, пружина становится жестче. Для определения параметров пружины необходимо рассчитать ее жесткость.

Данная конструкция сверла позволит реализовать изменение скорости подачи на этапе входа и выхода инструмента из обрабатываемого материала.

Изменяя параметры упругих элементов, можно использовать данный инструмент для различных плитных материалов с разным покрытием по толщине и плотности.

Использование данного типа инструмента при сверлении плитных материалов позволит в значительной мере сократить количество брака, увеличить производительность вместе со снижением энергопотребления.

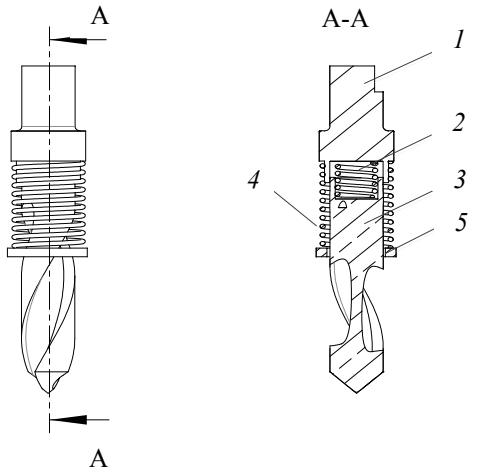


Рис. 2. Прототип предлагаемого инструмента:
1 – оправка; *2* – внутренняя пружина; *3* – сверло;
4 – внешняя пружина; *5* – шайба

Расчетная схема для решения системы упругих элементов приведена на рис. 3.

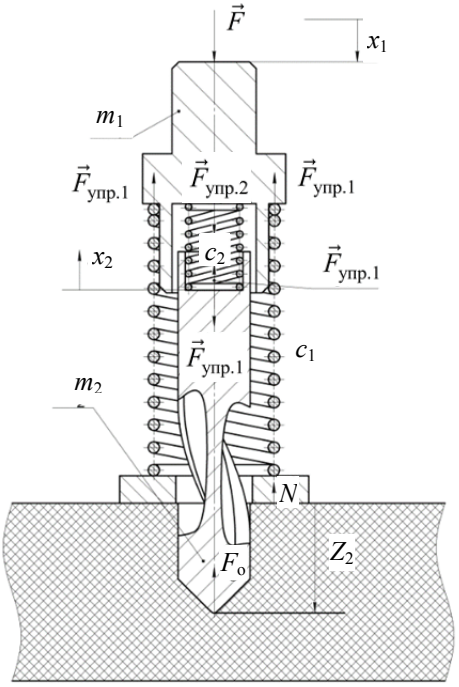


Рис. 3. Расчетная схема

Для решения составим следующие дифференциальные уравнения:

$$m_1\ddot{x}_1 = F - c_1x_2\,; \qquad (1)$$

$$m_2\left(\ddot{x}_1 - \ddot{x}_2\right) = c_1x_2 - F_0\ , \qquad (2)$$

где F – тяговое усилие, Н; c_1 – коэффициент жесткости внешней пружины, Н/м; x_1 – деформация внешней пружины, м; x_2 – деформация внутренней пружины, м.

Выразим из (1) $\ddot{x}_1$ и подставим в (2):

$$m_2\left(\frac{F - c_1x_2}{m_1} - \ddot{x}_2\right) = c_1x_2 - F_0\,. \qquad (3)$$

Преобразуем выражение (3), поделив правую и левую часть на m_2:

$$\ddot{x}_2 + c_1x_2\frac{m_1 + m_2}{m_1m_2} = \frac{F_0}{m_2} + \frac{F}{m_1}\,. \qquad (4)$$

Для удобства записи произведем замену

$$\mu = \frac{m_1m_2}{m_1 + m_2};\ K = \frac{F_0}{m_2} + \frac{F}{m_1}\,.$$

Тогда выражение (4) примет вид

$$\ddot{x}_2 + \frac{c_1}{\mu}x_2 = K. \qquad (5)$$

Решением данного уравнения будет являться выражение

$$x_2 = A\cos k_2t + B\sin k_2t + \frac{K}{c_1}\mu\,, \qquad (6)$$

где k_2 – частота колебаний, $с^{-1}$:

$$k_2 = \sqrt{\frac{c_1}{\mu}}\,. \qquad (7)$$

Для определения констант A и B продифференцируем выражение (6):

$$\dot{x}_2 = -Ak_2\,sin\,k_2t + Bk_2\,cos\,k_2t\,. \qquad (8)$$

Начальные условия: $\dot{x}_2 = 0$; $x_2 = 0$; $t = 0$.

Тогда из (6) и (7) следует, что $A = -\frac{K}{c_1}\mu$; $B = 0$

Таким образом, с учетом найденных констант, выражение (5) примет вид

$$x_2 = \frac{K}{c_1}\mu\left(1 - \cos k_2t\right). \qquad (9)$$

Подставим выражение (9) в (2) и получим

$$m_1\ddot{x}_1 = F - K\mu(1 - \cos k_2t)\,. \qquad (10)$$

Разделим правую и левую часть на m_1:

$$\ddot{x}_1 = \frac{F - K\mu}{m_1} + \frac{K\mu}{m_1}\cos k_2t\,. \qquad (11)$$

Для определения $\dot{x}_1$ проинтегрируем выражение (11):

$$\dot{x}_1 = \int_0^t \frac{F - K\mu}{m_1} dt + \int_0^t \frac{K\mu}{m_1} \cos k_2 t dt .$$

Получим

$$\dot{x}_1 = \frac{F - K\mu}{m_1} t + \frac{K\mu}{m_1 k_2} \sin k_2 t \ + \ C_1 . \qquad (12)$$

Чтобы найти x_1, проинтегрируем выражение (12):

$$x_1 = \int_0^t \frac{F - K\mu}{m_1} t dt + \int_0^t \frac{K\mu}{m_1 k_2} \sin k_2 t dt + \int_0^t C_1 dt .$$

Получим

$$x_1 = \frac{F - K\mu}{m_1} t^2 - \frac{K\mu}{m_1 k_2^2} \cos k_2 t + C_1 t + C_2 , \qquad (13)$$

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования.

Для определения постоянных интегрирования зададимся начальными условиями: $\dot{x}_1 = V_s$, так как в начальный момент времени тело m_1 двигалось со скоростью V_s; $x_1 = 0$; $t = 0$.

Таким образом, подставляя начальные условия в выражения (12) и (13), получим $C_1 = V_s$; $C_2 = -\frac{K\mu}{m_1 k_2^2}$.

Деформация внешней пружины

$$x_1 = \frac{F - K\mu}{m_1} t^2 + V_s t + \frac{K\mu}{m_1 k_2^2} (1 - \cos k_2 t) . \qquad (14)$$

Тогда углубление сверла z_2 найдем из выражения

$$z_2 = x_1 - x_2 . \qquad (15)$$

Подставив (9) и (14) в (15), получим

$$z_2 = \frac{F - K\mu}{m_1} t^2 + V_s t + \frac{K\mu}{m_1 k_2^2} (1 - \cos k_2 t) - \frac{K}{c_1} \mu (1 - \cos k_2 t). \qquad (16)$$

Преобразовав выражение (16) с учетом (7), получим

$$z_2 = \frac{F - K\mu}{m_1} t^2 + V_s t + (1 - \cos k_2 t) \left(\frac{K\mu^2}{m_1 c_1} - \frac{K\mu}{c_1} \right). \qquad (17)$$

Однако выражение (17) довольно сложно оптимизировать, поэтому расчет будем вести с той позиции, что сила F является постоянной. Тогда $x_1 = V_s t$ $\dot{x}_1 = V_s$, $\ddot{x}_1 = 0$; $t = 0$.

$$m_2 \left(\ddot{x}_1 - \ddot{x}_2 \right) = c_2 x_2 - F , \qquad (18)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2 x_2 = F . \qquad (19)$$

Произведем замену

$$k_{20}^2 = \frac{c_2}{m_2} . \qquad (20)$$

Также представим F как

$$F = \frac{F_0}{h} (V_s t - x_2) , \qquad (21)$$

где h – биссектриса угла заточки сверла, м.

Разделим правую и левую часть на m_2 и с учетом (20) и (21) получим

$$\ddot{x}_2 + k_{20}^2 x_2 = \frac{F_0}{m_2 h} \left(V_s t - x_2 \right) . \qquad (22)$$

Для облегчения расчетов произведем замену

$$k_2^2 = k_{20}^2 + \frac{F_0}{m_2 h} . \qquad (23)$$

Тогда выражение (22) примет вид

$$\ddot{x}_2 + k_2^2 x_2 = \frac{F_0 V_s}{m_2 h} t . \qquad (24)$$

Решением выражения (24) будет являться

$$x_2 = B \sin k_2 t + \frac{F_0 V_s}{m_2 h k_2^2} t. \qquad (25)$$

Для определения констант A и B продифференцируем выражение (25):

$$\dot{x}_2 = B k_2 \cos k_2 t + \frac{F_0 V_s}{m_2 h k_2^2} . \qquad (26)$$

Начальные условия: $\dot{x}_2 = 0$; $x_2 = 0$; $t = 0$; тогда

$$B = -\frac{F_0 V_s}{m_2 h k_2^3} .$$

Выражение (26) примет вид

$$x_2 = \frac{F_0 V_s}{m_2 h k_2^2} t - \frac{F_0 V_s}{m_2 h k_2^3} \sin k_2 t . \qquad (27)$$

Углубления сверла найдем по формуле (15), с учетом (27) и условий работы системы получим

$$z_2 = V_s t - \frac{F_0 V_s}{m_2 h k_2^2} t + \frac{F_0 V_s}{m_2 h k_2^3} \sin k_2 t . \qquad (28)$$

Произведем замену

$$\frac{F_0}{m_2 h} = k_2^2 - k_{20}^2 . \qquad (29)$$

Тогда

$$z_2 = \frac{k_{20}^2}{k_2^2} V_s t + \left(1 - \frac{k_{20}^2}{k_2^2}\right) \frac{V_s}{k_2} \sin k_2 t . \qquad (30)$$

Продифференцируем выражение (30):

$$\dot{z}_2 = \frac{k_{20}^2}{k_2^2} V_s + V_s \left(1 - \frac{k_{20}^2}{k_2^2}\right) \cos k_2 t = V_s \cos k_2 t + \frac{2k_{20}^2}{k_2^2} V_s \sin^2 \frac{k_2 t}{2}. \qquad (31)$$

Тогда с учетом (41) получим

$$z_2 = \frac{k_{20}^2}{k_2^2} V_s t + \frac{V_s}{k_2} \sin k_2 t . \qquad (32)$$

Как видно из выражения (31), при углублении сверла на z_2 скорость будет уменьшаться. Однако для точного расчета необходимы более детальные исследования.

Известно, что наиболее высокая достоверность результатов исследований выходных показателей процесса резания достигается при реализации всего комплекса измерений по единой методике с соблюдением одинаковых условий выполнения экспериментальных работ.

Учитывая данное условие, при исследовании качественных и стойкостных показателей процесса сверления ламинированной древесностружечной плиты одновременно фиксировалась мощность, затрачиваемая на резание, с реализацией методических сеток опытов по отсеиванию малозначимых переменных факторов.

Теоретические исследования всегда являются приближенными и не учитывают всех факторов, которые влияют на переменную величину. Именно поэтому будут проводиться дальнейшие исследования в данной области с проведением экспериментов.

Заключение. При проектировании дереворежущего инструмента, в частности сверла винтового с адаптивными возможностями, актуальным является вопрос исследования влияния технологических режимом (скорости подачи и частоты вращения) на качество обрабатываемой поверхности.

Особенностью применения упругих элементов в конструкции сверлильного инструмента является то, что пружина с переменным шагом позволит механически регулировать скорость подачи во время обработки.

Существующие сверлильные инструменты, предназначенные для обработки древесины твердых и мягких пород, плитных материалов имеют один существенный недостаток: они предназначены для обработки только конкретного вида материала на определенных технологических режимах.

В связи с вышесказанным актуально и целесообразно использовать упругие элементы (пружины с переменным шагом) в конструкции сверлильного инструмента, которые позволят независимо регулировать скорость подачи на входе и выходе из отверстия сверла, что значительно увеличит производительность оборудования за счет хорошего качества обработанной поверхности.

Список литературы

1. Волынский В. Н. Технология древесных плит и композитных материалов: учебно-справочное пособие. СПб.: Лань, 2010. 336 с.

2. Грубе А. Э. Дереворежущие инструменты. М.: Лесная промышленность, 1971. 339 с.

3. Цуканов Ю. А., Амалицкий В. В. Обработка резанием древесностружечных плит. М.: Лесная промышленность, 1966. 94 с.

4. Аникеенко А. Ф. Технологические режимы сверления ламинированных древесностружечных плит, обеспечивающие установленное качество // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды XII Международного евразийского симпозиума, 19−22 сент. 2017 г. / Уральский государственный лесотехнический университет. Екатеринбург, 2017. С. 197−201.

References

1. Volynski V. N. *Tekhnologiya drevesnykh plit i kompozitnykh materialov* [Technology wood stoves and composite materials]. St. Petersburg, Lan’ Publ., 2010. 336 p.

2. Grube A. E. *Derevorezhushchiye instrumenty* [Wood cutting tools]. Moscow, Lesnaya promyshlennost’ Publ., 1971. 339 p.

3. Tsukanov Yu. A., Amalitskiy V. V. *Obrabotka rezaniyem drevesnostruzhechnykh plit* [Cutting processing of particle boards]. Moscow, Lesnaya promyshlennost’ Publ., 1966. 94 p.

4. Anikeenko A. F. Technological modes of drilling laminated chipboard, ensuring the established quality. *Derevoobrabotka: tekhnologii, oborudovaiye, menedzhment XXI veka: Trudy XII Mezhdunarod-*

nogo evraziyskogo simpoziuma [Woodworking: technologies, equipment, management of the XXI century: proceedings of the XII International Eurasian Symposium]. Ural'skiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskiy universitet. Ekaterinburg, 2017, pp. 197–201 (In Russian).

Информация об авторах

Аникеенко Андрей Федорович − кандидат технических наук, доцент кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dosy@belstu.by

Машорипова Татьяна Александровна – аспирант кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dosy@belstu.by

Information about the authors

Anikeenko Andrey Fedorovich − PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dosy@belstu.by

Mashoripova Tatiana Aleksandrovna – PhD student, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dosy@belstu.by

Поступила 14.03.2020

УДК 674.05:621.914.1

В. Н. Гаранин, Д. Л. Болочко
Белорусский государственный технологический университет

ОБОСНОВАНИЕ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ОБРАБОТКИ АНИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА

В представленной работе уделено внимание разработке модели, позволяющей обосновать применение высоких скоростей резания древесины и древесных материалов, которые используются в современном оборудовании.

Предлагаемая модель основана на взаимодействии ножа с анизотропным материалом с целью упрощения работ по нахождению оптимальных скоростей взаимодействия инструмента с древесиной по критерию качества деления материала.

В представленной работе особое внимание уделяется скорости распространения напряжений сжатия в анизотропном материале, позволяющей в упрощенном виде определить работу на сжатие материала в зоне резания. Предлагаемая модель дает возможность определить в том числе и для изотропного материала требуемые оптимальные скорости взаимодействия режущего лезвийного инструмента с обрабатываемым материалом. Использование слишком высоких скоростей будет приводить к увеличению затрат мощности, не связанных с процессом деления материала, а использование слишком малых скоростей – к чрезмерной деформации материала, которая может привести к возникновению дефектов обработки.

Таким образом, в работе делается обоснование необходимых минимальных скоростей резания при обработке различных материалов, обладающих определенными физико-механическими свойствами, что является важным при исследовании деления новых материалов в деревообработке.

Ключевые слова: резание, скорость, древесина, напряжение, качество, деформация.

V. N. Garanin, D. L. Bolochko
Belarusian State Technological University

INCREASING THE CUTTING SPEED DURING WOOD BOOSTER MILLING

In the present work, attention is paid to the development of a model that allows us to substantiate the use of high cutting speeds of wood and wood materials, which are used in modern equipment.

The proposed model is based on the interaction of the knife with an anisotropic material in order to simplify the work on finding the optimal interaction rates of the tool with wood by the criterion of the quality of the division of the material.

In the present work, special attention is paid to the speed of propagation of compressive stresses in an anisotropic material, which makes it possible to determine in a simplified form the work on compressing the material in the cutting zone. The proposed makes it possible to determine, including for an isotropic material, the required optimal interaction speeds of the cutting blade tool with the processed material. Using too high speeds will lead to an increase in power costs not related to the material division process, and using too low speeds will lead to excessive deformation of the material, which can lead to processing defects.

Thus, the study substantiates the necessary minimum cutting speeds when processing various materials with certain physical and mechanical properties, which is important in the study of fission of new materials in woodworking.

Key words: cutting, speed, wood, stress, quality, deformation.

Введение. Резание древесины, как изотропного материала, связано с необходимостью использования высоких скоростей резания, применение которых ведет к высоким затратам энергии и росту рисков получения травм. Применение в промышленности новых материалов на основе древесины требует использования новых режимов и нового инструмента для работы. В частности, обоснование скоростей резания при обработке новых материалов на основе древесины является важной задачей, позволяющей оптимизировать процесс резания и тем самым получить требуемое качество обработки с минимальными затратами энергии на резание.

Таким образом, целью представленной работы является разработка упрощенной модели процесса деления материала сжимающими напряжениями, позволяющей оценить влияние и выбрать оптимальную скорость взаимодействия лезвийного инструмента с обрабатываемым материалом по критерию обеспечения качества резания.

Основная часть. При обработке древесины различными видами инструмента в настоящее время используются разные режимы резания. Для сравнения ниже в таблице приведем кинематические параметры обработки древесины различными видами обработки [1].

Механическая обработка любого материала связана с созданием необходимых разрушающих напряжений в зоне резания. Для этой цели при обработке древесины используется лезвийный инструмент, режущий элемент которого при резании концентрирует на лезвии нужное напряжение взаимодействия при резании на дуге контакта.

Обработка материалов с низкими параметрами жесткости в данном взаимодействии с инструментом ведет к трудностям, связанным с возникновением деформаций, которые не способствуют концентрации напряжений, а наоборот – к их рассредоточению, приводящему к суммарному увеличению сил, необходимых для обеспечения процесса деления материала в зоне резания (рис. 1).

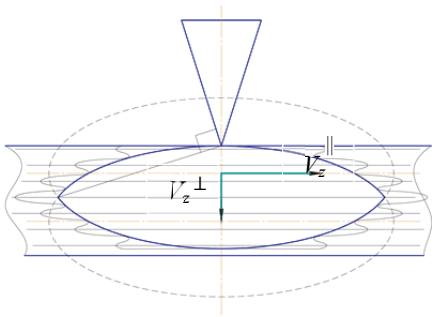


Рис. 1. Распределение напряжений при воздействии ножа на древесину

В данной ситуации обрабатываемый материал необходимо «замораживать», т. е. предпринимать меры по снижению деформирования во время деления.

Способ «замораживания» при обработке древесины обеспечивается благодаря использованию высоких скоростей резания, не позволяющих материалу успеть изменить свои геометрические параметры в зоне резания. В таком случае имеет место в зоне резания удар, который и оказывает основное влияние на выбор материала лезвия инструмента. С точки зрения энергии, удар следует рассматривать как процесс рассредоточения кинетической энергии ударяемого тела между взаимодействующими объектами.

Рассмотрим более простую модель создания напряжений сжатия у материала с анизотропными свойствами (рис. 2). При этом введем предположения, что режущая кромка является абсолютно острой (радиус округления равен нулю), а плоскости ножа являются абсолютно гладкими (коэффициент трения древесины о поверхности равен нулю). Процесс резания приобретает форму распространения трещины [2].

Работа на сжатие материала A, Дж, в зоне резания будет выражаться следующей зависимостью согласно [3]:

$$dA = \frac{\sigma^2}{2E} dV, \qquad (1)$$

где σ – напряжение в зоне V, Па; E – модуль упругости, Па; V – объем материала в напряженном состоянии, м^3.

Объем материала, который подвергается воздействию сжимающих напряжений, будет зависеть от скорости распространения напряжения сжатия, которую, в свою очередь, можно приравнять к скорости звука в материале. На основании рис. 2, *а* объем материала в напряженном состоянии V, м^3, будет выражаться зависимостью (2):

$$V = \int_0^{x_m} B(\pi - \beta) x dx = \frac{B(\pi - \beta) X_m^2}{2}, \qquad (2)$$

где B – ширина ножа, мм; β – угол заострения, град.; x – координата распространения волны сжатия в материале по оси x, мм; X_m – координата деформации слоя, мм.

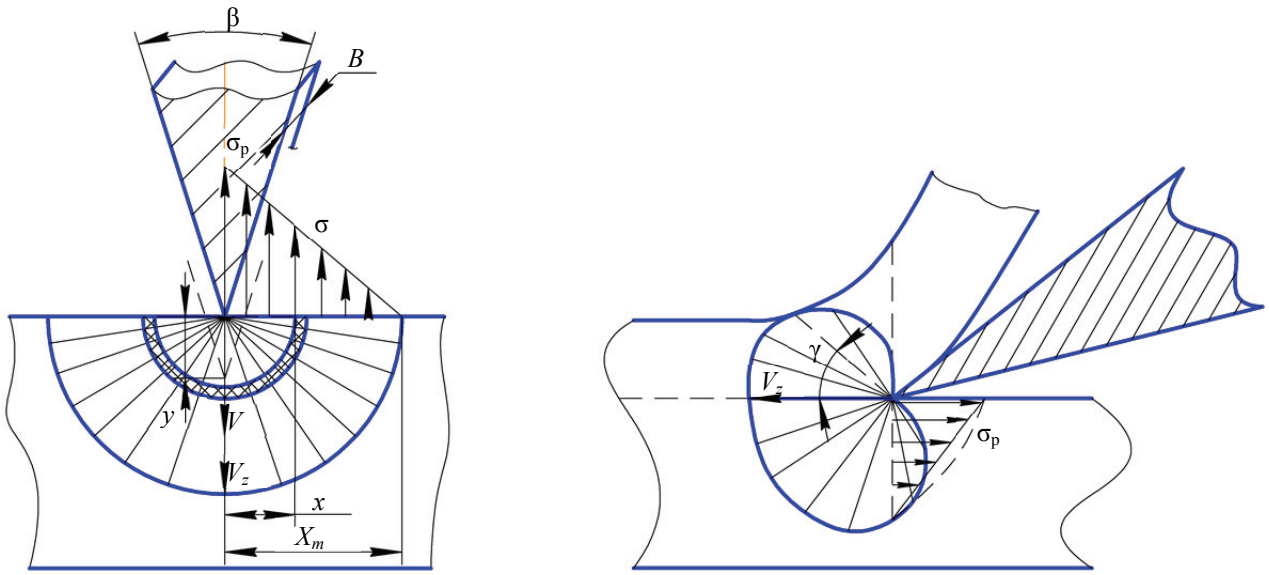
Переводя выше представленную модель на процесс резания со стружкообразованием (рис. 2, *б*), зависимость (2) можно преобразовать в следующий вид:

$$V = \int_0^{x_m} B(\frac{\pi}{2} + \gamma) x dx = \frac{B(\pi/2 + \gamma) X_m^2}{2}, \qquad (3)$$

где γ – передний угол, град.

Скорости при обработке древесины лезвийным инструментом

Вид обработки	Скорость резания $V_р$, м/с	Скорость подачи V_s, м/мин	Частота вращения n, мин$^{-1}$
Пиление рамными пилами	3–8	4–20	200–800
Пиление ленточными пилами	30–50	1–120	1000–2000
Пиление дисковыми пилами	50–120	1–150	3000–4500
Фрезерование	20–50	8–150	3000–24 000
Сверление	1–12	1–5	2000–6000



а *б*

Рис. 2. Распределение напряжения сжатия у материала с анизотропными свойствами:
а – без стружкообразования; *б* – со стружкообразованием

С целью рассмотрения статического характера распределения напряжений в материале, пропорционально зависящего от деформации, используем для дальнейших расчетов следующую линейную зависимость роста напряжений сжатия σ, Па, в материале (рис. 2, *а*):

$$\sigma = \sigma_{\text{р}} \left(1 - \frac{x}{X_m} \right), \tag{4}$$

где $\sigma_{\text{р}}$ – разрушающее напряжение сжатия материала, Па.

Подставляя зависимость (2) в (1), получим следующую закономерность:

$$A = \frac{\sigma_{\text{р}}^2 B(\pi - \beta)}{48E^2} X_m^2. \tag{5}$$

В данной ситуации условную длину распространения волны сжимающих напряжений можно представить в виде следующей схемы (рис. 3).

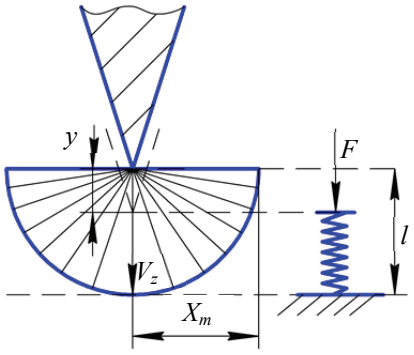


Рис. 3. Схема распространения волны сжимающих напряжений

Длина деформируемого слоя *l*, мм, определяется по зависимости

$$l = X_m = V_z t, \tag{6}$$

где V_z – скорость звука в материале, м/с; t – время распространения напряжения, с.

$$t = \frac{y}{V_{\text{р}}} = \frac{\sigma_{\text{р}} l}{E V_{\text{р}}}, \tag{7}$$

где y – координата распространения волны сжатия по оси y, мм; $V_{\text{р}}$ – скорость резания, м/с.

Таким образом, подставляя данные (6) в (7) и сокращая время воздействия на материал со стороны инструмента, можно получить скорость воздействия на анизотропный материал $V_{\text{р}}$, м/с, лезвием инструмента, при которой будет обеспечена оптимальная скорость резания с точки зрения градиента сжимающих напряжений:

$$V_{\text{р}} = \frac{V_z \sigma_{\text{р}}}{E}. \tag{8}$$

Превышение данной скорости (не рассматривая скорости близкие к скоростям звука) будет приводить к увеличению затрат мощности, не связанных с процессом деления материала, а использование меньших скоростей – к чрезмерной деформации материала, которая может привести к возникновению дефектов обработки.

Например, рассмотрим в некотором приближении древесину как анизотропный материал с характеристиками [4]:

– разрушающее напряжение сжатия сосны вдоль волокон – $\sigma_{\text{р}}$ = 46 МПа;

– модуль упругости – E = 11,3 ГПа;

– плотность сосны (W = 12%) – ρ = 500 кг/м^3.

Скорость распространения звука в материале V_z, м/с, согласно [5] находим по зависимости

$$V_z = \sqrt{\frac{1,35E}{\rho}}, \qquad (9)$$

$$V_z = \sqrt{\frac{1,35 \cdot 11,3 \cdot 10^9}{500}} = 5524 \text{ м/с}.$$

Причем, если рассмотреть характеристики материала поперек волокон согласно [2], скорость распространения звука составит 1560–2167 м/с (в зависимости от направления радиального или тангенциального), т. е. при $\sigma_р = 5,1$ МПа, $E = 1,74$ ГПа.

Скорость резания $V_р$, м/с, необходимую для создания волны напряжений в материале, не зависящей от времени взаимодействия, используя зависимость (8), составит:

– вдоль волокон

$$V_р = \frac{5524 \cdot 46 \cdot 10^6}{11,3 \cdot 10^9} = 22,5 \text{ м/с};$$

– поперек волокон

$$V_р = \frac{2167 \cdot 5,1 \cdot 10^6}{1,74 \cdot 10^9} = 6,35 \text{ м/с}.$$

Исходя из полученных результатов, при обработке древесины фрезерованием взаимодействие ножа с материалом происходит не в чистом виде (вдоль или поперек). По этой причине необходимо руководствоваться максимальными скоростями, полученными при исследовании направлений взаимодействия. В нашем случае это скорость 22,5 м/с.

Таким образом, представленная выше закономерность (8) в определенном приближении позволяет оценить необходимые скорости для взаимодействия лезвийного инструмента с обрабатываемым материалом, который предполагается обрабатывать впервые. Полученные числовые значения подтверждают те оптимальные скорости резания, которые рекомендуются исследователями, которые занимались изучением процесса резания древесины [6–8], в том числе данным, представленным в таблице.

Использование высоких скоростей резания древесины и древесных материалов в таком случае является необходимым фактором создания разрушающих напряжений в зоне резания при лезвийной обработке.

Однако представленная модель на основании зависимости (8) не отражает влияние скорости взаимодействия на характер распределения напряжений сжатия. Напряжения носят статический характер, характерный в большей степени для мало скоростных процессов резания материалов.

Предложим внести изменения в зависимость (4) включением показателя степени, характеризующей нелинейность зависимости напряжений сжатия в материалы от зоны вокруг режущей кромки. С учетом (8) зависимость (4) примет следующий вид:

$$\sigma = \sigma_р \left(1 - \frac{x}{X_m}\right)^{\frac{V}{V_р}} = \sigma_р \left(1 - \frac{x}{X_m}\right)^{\frac{VE}{V_z \sigma_р}}. \qquad (10)$$

Таким образом, зависимость кривой напряжений от скорости резания $V_р$, м/с, будет иметь характер, представленный на рис. 4.

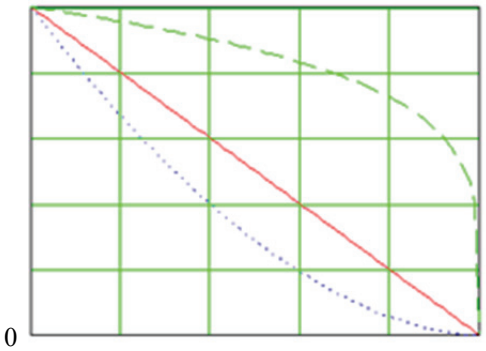


Рис. 4. Влияние скорости резания на напряжения сжатия

Работа на разрушение материала уже будет иметь следующий вид:

$$A = \frac{\sigma_р^2 B(\pi - \beta)}{4E^2} \int_0^{X_m} x \left(1 - \frac{x}{X_m}\right)^{\frac{2V}{V_р}} dx. \qquad (11)$$

В представленных выше зависимостях основным неизвестным является параметр X_m, от величины которого зависит площадь распространения напряжений сжатия в материале. От величины этого параметра будет зависеть работа и мощность на резание. Данный параметр можно определить, сопоставляя работу на разрушение материала с формулой (9). Так, рассматривая результаты исследований [9], удельная работа (к ширине ножа) на деление сосны вдоль и поперек волокон (при устремлении угла резания к нулю) составит 7 мДж/мм. Проведенные исследования позволяют определить параметр X_m при скорости резания 2,5 м/с, т. е.

X_m = 0,31 мм, который показывает, что основные сжимающие напряжения (без учета влияния передней и задней поверхностей ножа) находятся около зоны резания на расстоянии 0,31 мм.

Зависимость работы на создание напряжений сжатия от скорости резания будет иметь вид, представленный на рис. 5.

Рассматривая влияние скорости резания согласно работе Любченко [10], увеличение скорости резания с 40–50 до 100 м/с может вызвать увеличение силы резания на 30–40%. Считается, что это приращение силы резания связано с преодолением сил инерции стружки, повышением прочностных показателей древесины в условиях больших скоростей нагружения, изменением условий трения древесины о лезвие и влиянием других факторов.

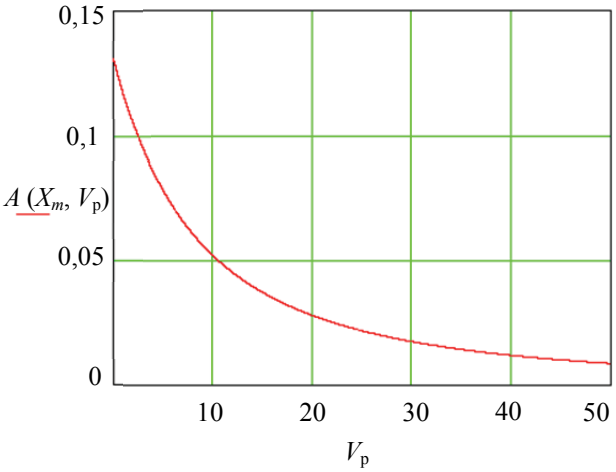


Рис. 5. Влияние скорости V_p на работу создания напряжений сжатия A (X_m, V_p)

Представленная в данной работе модель показывает, что с увеличением скорости резания работа на разрушение материала снижается из-за уменьшения объема деформируемого материала в зоне резания и утверждение Любченко об изменении прочностных показателей древесины не находит здесь объяснений.

В нашем случае следует обратить внимание на одно обстоятельство. С увеличением скорости резания увеличивается кривизна траектории напряжений сжатия, что приводит к увеличению градиента напряжений. В таких условиях наблюдается рост касательных напряжений в материале, что в условиях изотропности обрабатываемого материала (древесины) может приводить к дефектам обработки вдоль волокон. Этим обстоятельством в основном и объясняется необходимость выбора угла резания при обработке различных пород древесины с целью обеспечения качества обработки. А с учетом предлагаемой модели можно утверждать, что углы резания, используемые для обработки древесины, зависят не только от физико-механических свойств обрабатываемого материала, но и от скорости резания.

Рассмотрим работоспособность предлагаемой модели влияния скорости резания на энергетику разрушения материала на результатах исследования мощностных характеристик процесса резания древесины.

Согласно [7] мощность, потребляемая на ускорение отхода стружки, превышает 20% от общей мощности резания при скорости резания 55,5 м/с. С увеличением скорости резания эта доля возрастает. Предполагается, что изменение скорости резания влияет на оценочные показатели резания через противоречиво действующие факторы (например, увеличиваются силы инерции стружки, но уменьшается коэффициент трения) и совокупный эффект при некоторых условиях резания может быть минимальным.

В практических расчетах сил влияние скорости резания учитывают поправочными множителями, найденными для конкретных процессов сложного резания по результатам экспериментов.

Качество обработки с увеличением скорости резания повышается. Положительное влияние увеличения скорости объясняется появлением «добавочного подпора» за счет силы инерции, который получают перерезаемые волокна древесины в дополнение к естественному сцеплению между ними. С появлением такого подпора волокна не успевают отклониться под давлением лезвия и перерезаются им раньше, чем нарушится связь их с соседними волокнами. В результате уменьшаются неровности разрушения на обработанной поверхности. Понятие подпора в данном случае рассматривается как фактор, позволяющий улучшить качество обработки.

В предлагаемой нами модели функцию подпора выполняет часть материала, которая находится рядом с зоной деления материала (из-за чего снижается риск неуправляемого разрушения материала вне зоны резания (рис. 2)), но с другой стороны находится под высокими касательными (из-за высокого градиента напряжений сжатия), что может привести к неконтролируемому разрушению древесины около зоны резания под действием касательных напряжений. В этом случае использование скоростей резания, близких к скорости V_p (зависимость (8)), является оптимальным по критерию качества обработки, поскольку при меньших и больших скоростях резания увеличивается риск неконтролируемого деления материала вне зоны резания.

Подставляя в зависимость (8) скорости резания с 0 до 50 м/с и принимая одинаковый путь, пройденный инструментом в материале, и X_m, с некоторым допущением будет наблюдаться следующий вид увеличения мощности на деление материала по отношения к скорости $V_р$, определяемый по зависимости

$$К = \frac{A(V)V}{A(V_р)V_р}. \qquad (12)$$

На рис. 6 представлена кривая зависимости мощности P, кВт, от скорости резания $V_р$, м/с.

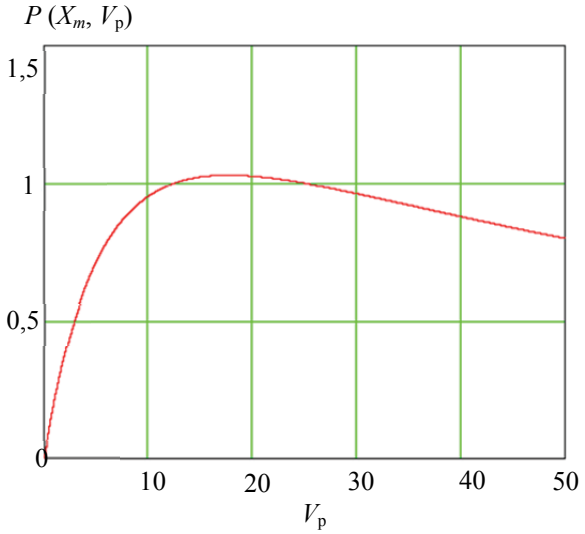


Рис. 6. Мощность создания напряжений сжатия P (X_m, $V_р$) в зависимости от скорости резания $V_р$

Таким образом, предложенная в данной работе упрощенная модель показывает, что при превышении скорости резания $V_р$ практически не наблюдается увеличение мощности на создание сжимающих напряжений в зоне резания. Требуемая максимальная накачка энергии для создания необходимых напряжений сжатия в зоне резания происходит уже при скорости выше 10 м/с, что видно из графика на рис. 6, когда коэффициент достигает максимальных значений. Практические результаты роста мощности резания следует уже искать в увеличении затрат на выброс стружки, а также в затратах энергии в приводах резания оборудования.

Так, согласно полученным экспериментальным данным [11], затраты мощности на холостой ход привода механизма резания фрезерного оборудования растут с увеличением частот вращения узлов. Величина мощности холостого хода в быстроходных приводах достаточно существенна и растет с увеличением частоты вращения.

В представленных исследованиях затраты мощности на холостой ход при 9000 мин $^{-1}$ составили 18,4% от номинальной мощности электродвигателя. Указанные затраты энергии не имеют никакого отношения к работе на разрушение древесины. Это лишь затраты на обеспечение требуемых скоростей резания, которые при появлении нагрузки при обработке древесины увеличиваются.

Заключение. Разработанная модель позволяет определить оптимальную скорость резания материала в зависимости от его физико-механических свойств. Предлагаемая модель подходит для материалов, которые обрабатываются лезвийным инструментом и разрушаются сжимающими напряжениями, при этом обеспечивается минимальное влияние угловых характеристик инструмента на условия создания требуемых напряжений в зоне резания. Это обстоятельство позволяет путем выбора нужной скорости резания повысить универсальность дереворежущего инструмента и, как результат, его адаптивность к обрабатываемому материалу.

Список литературы

1. Амалицкий В. В., Санев В. И. Оборудование и инструмент деревообрабатывающих предприятий. М.: Экология, 1992. 480 с.

2. Николаева Е. А. Основы механики разрушения. Пермь: ПГТУ, 2010. 103 с.

3. Писаренко Г. С. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Научная мысль, 1988. 736 с.

4. Уголев Б. Н. Древесиноведение и лесное товароведение. М.: Академия, 2004. 272 с.

5. Гаранин В. Н. Влияние вибрации лезвия инструмента на резание древесины и древесных материалов // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2007. Вып. XV. С. 239–242.

6. Бершадский А. Л. Резание древесины. Минск: Выш. шк., 1975. 303 с.

7. Кох П. П. Процессы механической обработки древесины / пер. с англ. и ред. канд. техн. наук В. В. Амалицкого. М.: Лесная пром-сть, 1969. 328 с.

8. Кряжев Н. А. Фрезерование древесины. М.: Лесная пром-сть, 1979. 200 с.

9. Гаранин В. Н. Результаты экспериментальных исследований, определяющие влияние угла атаки на силу и мощность процесса открытого резания древесины // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2008. Вып. XVI. С. 209–214.

10. Любченко В. И. Резание древесины и древесных материалов. М.: Лесная пром-сть, 1986. 296 с.

11. Гаранин В. Н. Исследование затрат мощности на холостой ход в приводе механизма резания станка Unimat 23 EL // Труды БГТУ. Сер. 2, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2011. № 2 (140). С. 241–244.

References

1. Amalitsky V. V., Sanev V. I. *Oborudovaniye i instrument derevoobrabatyvayushchikh predpriyatiy* [Equipment and tools for woodworking enterprises]. Moscow, Ekologiya Publ., 1992. 480 p.

2. Nikolaeva E. A. *Osnovy mekhaniki razrusheniya* [Fundamentals of fracture mechanics]. Perm', PSTU Publ., 2010. 103 p.

3. Pisarenko G. S. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Handbook of resistance to materials]. Kiev, Nauchnaya mysl' Publ., 1988. 736 p.

4. Ugolev B. N. *Drevesinovedeniye i lesnoye tovarovedeniye* [Wood science and forest commodity science]. Moscow, Academiya Publ., 2004. 272 p.

5. Garanin V. N. The effect of vibration of the tool blade on cutting wood and wood materials. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forestry and Woodworking Industry, 2007, issue XV, pp. 239–242 (In Russian).

6. Bershadskiy A. L. *Rezaniye drevesiny* [Wood cutting]. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1975. 303 p.

7. Kokh P. P. *Protsessy mekhanicheskoy obrabotki drevesiny* [Processes of mechanical processing of wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1969. 328 p.

8. Kryazhev N. A. *Frezerovaniye drevesiny* [Wood milling]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1979. 200 p.

9. Garanin V. N. The results of experimental studies determining the influence of the angle on the strength and power of the process of open cutting of wood. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forestry and Woodworking Industry, 2008, issue XVI, pp. 209–214 (In Russian).

10. Lyubchenko V. I. *Rezaniye drevesiny i drevesnykh materialov* [Cutting wood and wood material]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1986. 296 p.

11. Garanin V. N. Study of idle power consumption in the drive of the cutting mechanism of the Unimat 23 EL machine. *Trudy BGTU* [Proseedings of BSTU], series I, Forestry and Woodworking Industry, 2011, pp. 241–244 (In Russian).

Информация об авторах

Гаранин Виктор Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dosy@belstu.by

Болочко Дмитрий Леонидович – аспирант кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dima.bolochko.94@mail.ru

Information about the authors

Garanin Victor Nikolaevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dosy@belstu.by

Bolochko Dmitry Leonidovich – PhD student, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dima.bolochko.94@mail.ru

Поступила 12.03.2020

УДК 621.934: 674.815

Т. А. Машорипова, А. Ф. Аникеенко
Белорусский государственный технологический университет

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ СВЕРЛЕНИИ НОВЫМ АДАПТИВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Статья описывает необходимость создания новой конструкции сверлильного инструмента для сверления сквозных отверстий в ламинированных древесностружечных плитах. Проведен анализ рекомендуемых режимов сверления ламинированных древесностружечных плит. Рассмотрены дефекты при сверлении ламинированной древесностружечной плиты, связанные со свойствами основных слоев плитного материала. Обоснована необходимость в проектировании нового сверла для повышения эффективности эксплуатации оборудования.

В современных условиях для обработки древесины и древесных материалов используются разнообразные сверла. Проблемы, как и прежде, существуют. Трудности сверления связаны с получением удовлетворительного качества обрабатываемого отверстия.

Авторы провели теоретические и практические исследования влияния технологических параметров на качество получаемых поверхностей. Выполнен обзор научно-технической литературы по режимам сверления древесины и древесных материалов. На основе теоретических исследований сделано предположение о природе образования сколов на поверхности ламинированной древесностружечной плиты. Проведена серия опытов по исследованию качества получаемых отверстий на лабораторной установке на базе промышленной модели многооперационной машины с ЧПУ (числовым программным управлением). При такой организации сверления можно избежать сложных программ для станков с числовым программным управлением, повысить производительность труда.

Ключевые слова: сверление, скорость подачи, производительность, качество, древесностружечная плита.

T. A. Mashoripova, A. F. Anikeenko
Belarusian State Technological University

IMPROVING THE EFFICIENCY OF EQUIPMENT OPERATION WHEN DRILLING CHIPBOARDS

The article describes the need to create a new design of drilling tools for drilling through holes in laminated chipboard. The analysis of recommended drilling modes for laminated chipboard is carried out. Defects in drilling of laminated chipboard related to the properties of the main layers of the slab material are considered. The necessity of designing a new drill to improve the efficiency of equipment operation is justified.

In modern conditions, a variety of drills are used for processing wood and wood materials. Problems still exist. Drilling difficulties are associated with obtaining a satisfactory quality of the processed hole.

The authors conducted theoretical and practical studies of the influence of technological parameters on the quality of the obtained surfaces. The review of scientific and technical literature on drilling modes of wood and wood materials is performed. Based on theoretical research, the authors made an assumption about the nature of the formation of chips on the surface of laminated chipboard. A series of experiments was conducted to study the quality of the obtained holes on a laboratory installation based on an industrial model of a multi-operation CNC machine (numerically controlled). With this organization of drilling, you can avoid complex programs for numerical control machines, and increase labor productivity.

Key words: drilling, feed rate, productivity, quality, chipboard.

Введение. Особое значение имеет решение проблемы качества обработки древесины. До последнего времени исследование процесса резания древесины заключалось в большинстве случаев в решении силовых зависимостей и в малой степени раскрывало физическую сущность качества обработки и зависимость его от различных факторов. В то же время производительность обработки диктуется качеством ее – чистотой поверхности. В свою очередь чистота обработки зависит в большой степени от оптимальной геометрии инструмента и качества его подготовки к работе.

Эффективность эксплуатации при сверлении отверстий в древесно-стружечных плитах заключается в бездефектной обработке.

Таким образом, целью представленной работы является увеличение производительности оборудования при сверлении ламинированных ДСтП, за счет бесперерывного изменения скорости подачи при помощи новой конструкции сверлильного инструмента.

Основная часть. При обработке древесины различными видами инструмента в настоящее время используются разные режимы резания.

Интенсификация процессов механической обработки древесины способствует увеличению производительности и уменьшению трудоемкости производства деталей. Решение этой проблемы зависит от оптимальных качеств режущего инструмента, обеспечивающего высокие режимы резания при хорошем качестве и точности обработки.

В связи с тем, что все три слоя отличаются физико-механическими свойствами, возникает необходимость использовать технологические режимы, удовлетворяющие качественной обработке всех трех слоев одновременно (рис. 1) [1].

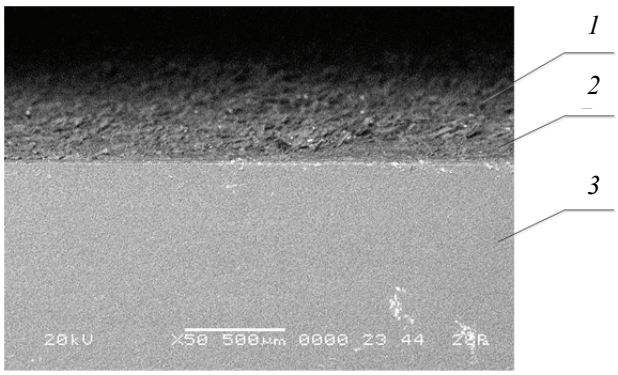


Рис. 1. Структура древесно-стружечной плиты:
1 – плита ДСтП; *2* – связующее; *3* – ламинат

Наиболее сложно выбрать технологические режимы для обработки хрупкого и очень твердого ламината с двух сторон рассматриваемого материала. Неправильно выбранный режим обработки приводит к появлению сколов, что недопустимо. Использование небольших скоростей подачи и большей частоты вращения сверла позволяет избавиться от такого рода брака, но негативно сказывается на производительности оборудования, периоде стойкости инструмента и энергопотреблении [2].

Существующие рекомендации по повышению эффективности оборудования при сверлении плитных материалов связаны с использованием подкладок под нижнюю пласть и на верхней пласти плитного материала, надежным закреплением и прижимом заготовок. Использование принудительной вытяжной системы во время сверления не исключает появления брака во время механической обработки.

Основными технологическими критериями, влияющими на качество сверления отверстий, выступают правильная геометрия режущего инструмента и грамотное назначение режимов резания. И если геометрические параметры сверл и их влияние на качество обработки изучено предметно, то при назначении режимов резания имеют место существенные трудности. Рекомендуемые производителями базовых материалов и твердосплавных сверл параметры обработки существенно разнятся между собой. Поэтому на реальном производстве, как правило, режимы резания назначаются инженером-технологом, исходя из его производственного опыта, что приводит к повышенному расходу режущего инструмента, частым остановкам оборудования и повышенному появлению сколов вокруг кромок, как на входе, так и на выходе сверла из получаемых отверстий [3].

Обеспечение качественной поверхности ламинированной древесностружечной плиты при сверлении отверстий является актуальной задачей, для решения которой разрабатываются новые алгоритмы программного управления станков, применяются современные инструментальные материалы, оптимизируются режимы обработки, а также проектируются новые конструкции сверлильного инструмента.

Существующие методики расчетов технологических режимов резания сверлением требуют усовершенствования. Устаревшая информация и теоретические изыскания, содержащиеся в научной и технической литературе, отсутствие конкретных практических данных не позволяют выполнять достоверные расчеты периода стойкости сверлильного инструмента и потребности в инструменте для выполнения заданного объема работ.

В связи с этим в данной работе спроектировано сверло спиральное сборное. Конструкция данного сверла состоит из хвостовика, тела сверла и двух пружин. Это сверло позволит, имея систему упругих элементов, с разными коэффициентами жесткости, обрабатывать древесностружечные плиты, в том числе и ламинированные, исключая возможность появления сколов на входе и выходе инструмента. Применение сверл данного типа в первую очередь позволит улучшить качество обработанной поверхности, а также повысить стойкость сверл, за счет уменьшения скорости подачи. Применение такого типа сверл также экономически выгодно, так как закупается только тело сверла, а хвостовики остаются прежние (рис. 2).

Данная конструкция сверла позволит реализовать изменение скорости подачи на этапе

входа и выхода инструмента из обрабатываемого материала.

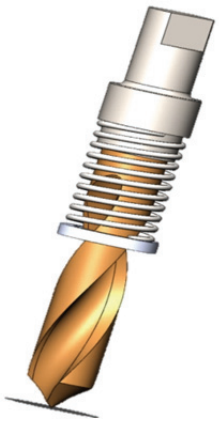


Рис. 2. Прототип предлагаемого инструмента

Изменяя параметры упругих элементов, можно применять данный инструмент для различных плитных материалов с разным покрытием по толщине и плотности.

Использование данного типа инструмента при сверлении плитных материалов позволит в значительной мере сократить количество брака, увеличить производительность вместе со снижением энергопотребления.

Были проведены экспериментальные исследования, с целью выявления оптимальных скоростей подачи с получением качественной поверхности обработки, для трех различных диаметров сверл с конической заточкой [4].

Для выполнения опытов на многооперационной машине с числовым программным управлением Rover B 4.35 была написана специальная программа, которая включала в себя высверливания по два отверстия на каждый режим.

После выполнения испытательных запусков по проверке правильности программы в рабочую зону машины устанавливалась испытуемая заготовка и начиналась обработка (рис. 3).

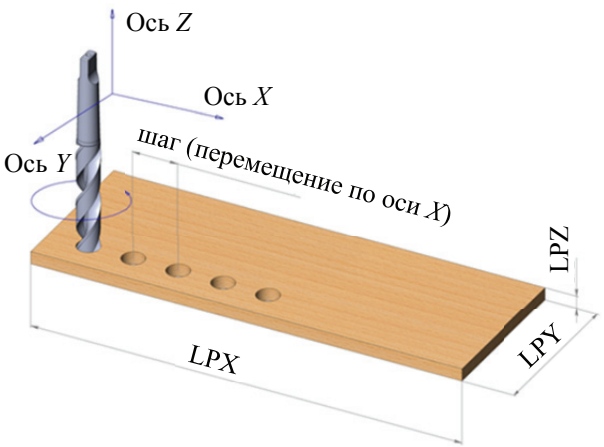


Рис. 3. Схема обработки испытуемой заготовки

На рис. 3 показано прямолинейное движение адаптивного инструмента, которое позволяет регулировать пятикоординатный шпиндельный узел обрабатывающего центра.

В программе реализована возможность настраивать значения требуемых переменных факторов, за исключением толщины стружки, которая изменялась косвенно через значение скорости подачи V_S.

Получение выходных данных и их обработка осуществляется с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) [5]. Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 4.

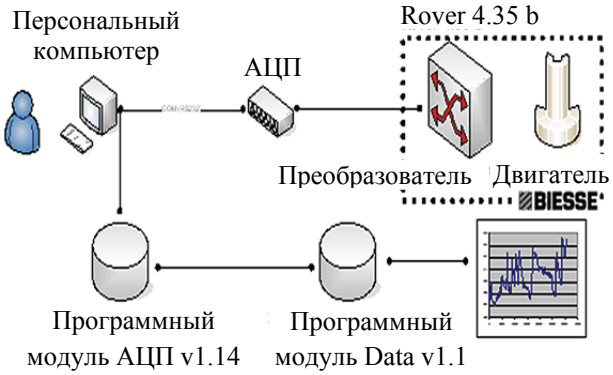


Рис. 4. Принципиальная схема

АЦП позволяет с точностью ±5 Вт регистрировать в реальном режиме времени энергозатраты процесса.

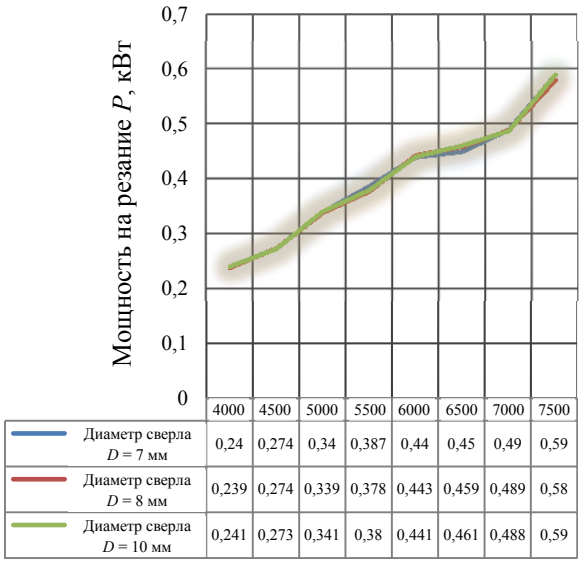
Выходным показателем определялось значение потребляемой мощности на резание при работе адаптивного инструмента.

Экспериментальные опыты проводились с использованием винтовых сверл трех диаметров (D = 7, 8, 10 мм) с конической заточкой, которые наиболее часто применяются на предприятиях, при следующих скоростях подачи V_S = 1–7 м/мин. Частота вращения инструмента была выбрана от 4000 мин$^{-1}$, хотя в литературе рекомендуется использовать до 3000 мин$^{-1}$. Такой выбор связан с тем, что в основном на предприятиях работают на высоких оборотах инструмента.

Для более удобного восприятия результатов эксперимента исследования мощности резания при вышеописанных переменных факторах будут представлены в графическом виде.

На рис. 5 дан график зависимости мощности от частоты вращения шпинделя при трех разных диаметрах сверла (D = 7, 8, 10 мм) при постоянной скорости подачи V_S = 1 м/мин.

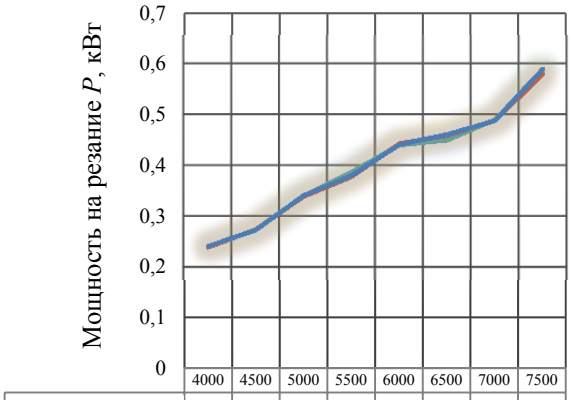
На рис. 6 представлен график зависимости мощности от частоты вращения шпинделя при трех разных диаметрах сверла (D = 7, 8, 10 мм) при постоянной скорости подачи V_S = = 2 м/мин.



	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500
Диаметр сверла D = 7 мм	0,24	0,274	0,34	0,387	0,44	0,45	0,49	0,59
Диаметр сверла D = 8 мм	0,239	0,274	0,339	0,378	0,443	0,459	0,489	0,58
Диаметр сверла D = 10 мм	0,241	0,273	0,341	0,38	0,441	0,461	0,488	0,59

Частота вращения шпинделя n, мин$^{-1}$

Рис. 5. Изменение мощности на шпинделе при сверлении ламинированной древесностружечной плиты сверлами с различными диаметрами при постоянной скорости подачи V_S = 1 м/мин



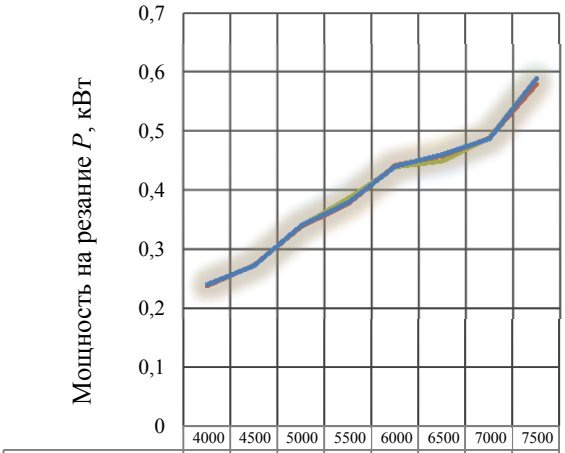
	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500
Диаметр сверла D = 7 мм	0,24	0,274	0,34	0,387	0,44	0,45	0,49	0,59
Диаметр сверла D = 8 мм	0,239	0,274	0,339	0,378	0,443	0,459	0,489	0,58
Диаметр сверла D = 10 мм	0,241	0,273	0,341	0,38	0,441	0,461	0,488	0,59

Частота вращения шпинделя n, мин$^{-1}$

Рис. 6. Изменение мощности на шпинделе при сверлении ламинированной древесностружечной плиты сверлами с различными диаметрами при постоянной скорости подачи V_S = 2 м/мин

На рис. 7 представлен график зависимости мощности от частоты вращения шпинделя при трех разных диаметрах сверла (D = 7, 8, 10 мм) при постоянной скорости подачи V_S = = 3 м/мин.

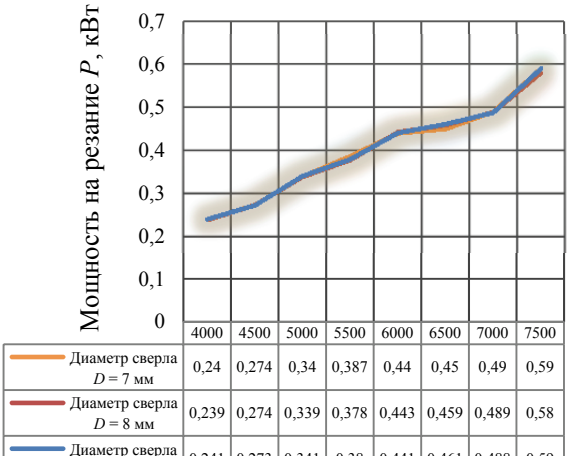
На рис. 8 представлен график зависимости мощности от частоты вращения шпинделя при трех разных диаметрах сверла (D = 7, 8, 10 мм) при постоянной скорости подачи V_S = = 4 м/мин.



	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500
Диаметр сверла D = 7 мм	0,24	0,274	0,34	0,387	0,44	0,45	0,49	0,59
Диаметр сверла D = 8 мм	0,239	0,274	0,339	0,378	0,443	0,459	0,489	0,58
Диаметр сверла D = 10 мм	0,241	0,273	0,341	0,38	0,441	0,461	0,488	0,59

Частота вращения шпинделя n, мин$^{-1}$

Рис. 7. Изменение мощности на шпинделе при сверлении ламинированной древесностружечной плиты сверлами с различными диаметрами при постоянной скорости подачи V_S = 3 м/мин

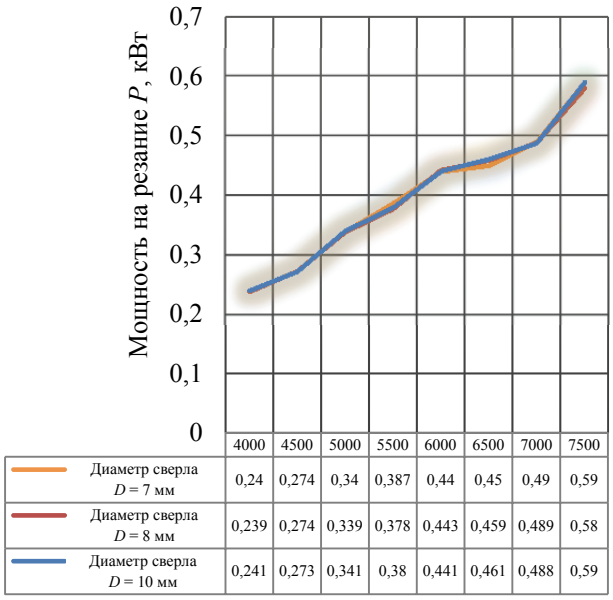


	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500
Диаметр сверла D = 7 мм	0,24	0,274	0,34	0,387	0,44	0,45	0,49	0,59
Диаметр сверла D = 8 мм	0,239	0,274	0,339	0,378	0,443	0,459	0,489	0,58
Диаметр сверла D = 10 мм	0,241	0,273	0,341	0,38	0,441	0,461	0,488	0,59

Частота вращения шпинделя n, мин$^{-1}$

Рис. 8. Изменение мощности на шпинделе при сверлении ламинированной древесностружечной плиты сверлами с различными диаметрами при постоянной скорости подачи V_S = 4 м/мин

На рис. 9 представлен график зависимости мощности от частоты вращения шпинделя при трех разных диаметрах сверла (D = 7, 8, 10 мм) при постоянной скорости подачи V_S = = 5 м/мин.

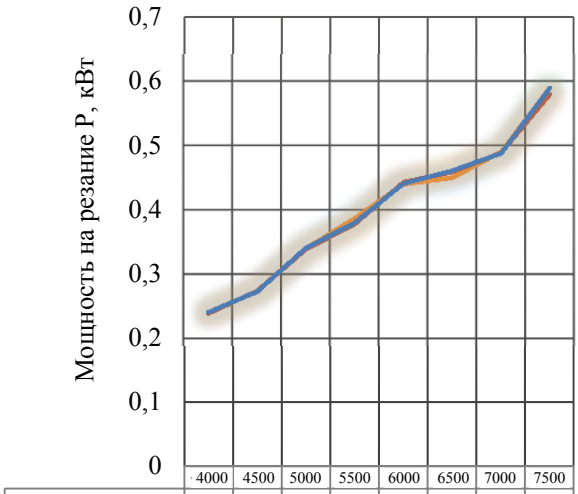


	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500
Диаметр сверла D = 7 мм	0,24	0,274	0,34	0,387	0,44	0,45	0,49	0,59
Диаметр сверла D = 8 мм	0,239	0,274	0,339	0,378	0,443	0,459	0,489	0,58
Диаметр сверла D = 10 мм	0,241	0,273	0,341	0,38	0,441	0,461	0,488	0,59

Частота вращения шпинделя n, мин$^{-1}$

Рис. 9. Изменение мощности на шпинделе при сверлении ламинированной древесностружечной плиты сверлами с различными диаметрами при постоянной скорости подачи V_S = 5 м/мин

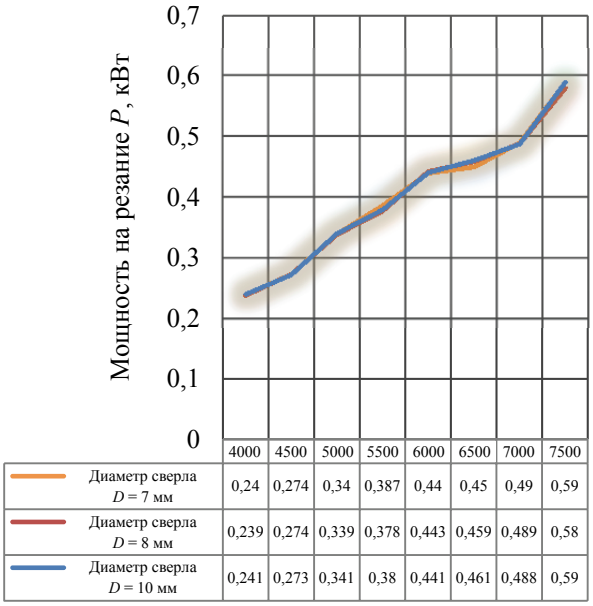
На рис. 10 представлен график зависимости мощности от частоты вращения шпинделя при трех разных диаметрах сверла (D = 7, 8, 10 мм) при постоянной скорости подачи V_S = 6 м/мин.



	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500
Диаметр сверла D = 7 мм	0,24	0,274	0,34	0,387	0,44	0,45	0,49	0,59
Диаметр сверла D = 8 мм	0,239	0,274	0,339	0,378	0,443	0,459	0,489	0,58
Диаметр сверла D = 10 мм	0,241	0,273	0,341	0,38	0,441	0,461	0,488	0,59

Частота вращения шпинделя n, мин$^{-1}$

Рис. 10. Изменение мощности на шпинделе при сверлении ламинированной древесностружечной плиты сверлами с различными диаметрами при постоянной скорости подачи V_S = 6 м/мин



	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500
Диаметр сверла D = 7 мм	0,24	0,274	0,34	0,387	0,44	0,45	0,49	0,59
Диаметр сверла D = 8 мм	0,239	0,274	0,339	0,378	0,443	0,459	0,489	0,58
Диаметр сверла D = 10 мм	0,241	0,273	0,341	0,38	0,441	0,461	0,488	0,59

Частота вращения шпинделя n, мин$^{-1}$

Рис. 11. Изменение мощности на шпинделе при сверлении ламинированной древесностружечной плиты сверлами с различными диаметрами при постоянной скорости подачи V_S = 7 м/мин

На рис. 11 представлен график зависимости мощности от частоты вращения шпинделя при трех разных диаметрах сверла (D = 7, 8, 10 мм) при постоянной скорости подачи V_S = = 7 м/мин.

Заключение. Исходя из вышеприведенных графиков, можно установить, что зависимость мощности от частоты вращения шпинделя носит практически линейный характер или слабовыраженные зависимости второго порядка. Анализ графиков на рис. 5–11 показывает, что потребление мощности на резание не особо отличается при трех разных диаметрах. И с увеличением частоты вращения и скорости подачи возрастает энергопотребление. На основании проведенных экспериментальных исследований по изучению зависимости качества обрабатываемой поверхности от изменения скорости подачи, а также частоты вращения можно сделать вывод, что изменение технологических режимов на скоростях подачи свыше 3 м/мин и частоте вращения до 5000 мин$^{-1}$ не обеспечивает получения поверхности высокого качества.

Одной из вероятных причин появления сколов является уменьшение заднего угла. Как показали расчеты, уменьшение заднего угла уже на среднем диаметре составляет порядка 5°.

Применение сверл данного типа в первую очередь позволит улучшить качество обработанной поверхности, а также повысить стойкость сверл за счет уменьшения скорости пода-

чи. Применение такого типа сверл также экономически выгодно, так как закупается только тело сверла, а хвостовики остаются прежние.

Использование данного типа инструмента при сверлении плитных материалов позволит в значительной мере сократить количество брака.

Список литературы

1. Грубе А. Э. Дереворежущие инструменты. М.: Лесная промышленность, 1971. 339 с.

2. Цуканов Ю. А., Амалицкий В. В. Обработка резанием древесностружечных плит. М.: Лесная промышленность, 1966. 94 с.

3. Бершадский А. Л. Резание древесины. Минск: Выш. шк., 1975. 303 с.

4. Аникеенко А. Ф. Технологические режимы сверления ламинированных древесностружечных плит, обеспечивающие установленное качество // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды XII Международного евразийского симпозиума, 19−22 сент. 2017 г. / Уральский государственный лесотехнический университет. Екатеринбург, 2017. С. 197−201.

5. Волынский В. Н. Технология древесных плит и композитных материалов: учебно-справочное пособие. СПб.: Лань, 2010. 336 с.

References

1. Grube A. E. *Derevorezhushchiye instrumenty* [Wood cutting tools]. Moscow, Lesnaya promyshlennost’ Publ., 1971. 339 p.

2. Tsukanov Yu. A., Amalitskiy V. V. *Obrabotka rezaniyem drevesnostruzhechnykh plit* [Cutting processing of particle boards]. Moscow, Lesnaya promyshlennost’ Publ., 1966. 94 p.

3. Bershadskiy A. L. *Rezaniye drevesiny* [Wood cutting]. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1975. 303 p.

4. Anikeenko A. F. Technological modes of drilling laminated chipboard, ensuring the established quality. *Derevoobrabotka: tekhnologii, oborudovaiye, menedzhment XXI veka: Trudy XII Mezhdunarodnogo evraziyskogo simpoziuma* [Woodworking: technologies, equipment, management of the XXI century: proceedings of the XII International Eurasian Symposium]. Ural’skiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskiy universitet. Ekaterinburg, 2017, pp. 197–201 (In Russian).

5. Volynski V. N. *Tekhnologiya drevesnykh plit i kompozitnykh materialov* [Technology wood stoves and composite materials]. St. Petersburg, Lan’ Publ., 2010. 336 p.

Информация об авторах

Машорипова Татьяна Александровна – аспирант кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dosy@belstu.by

Аникеенко Андрей Федорович − кандидат технических наук, доцент кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dosy@belstu.by

Information about the authors

Mashoripova Tatiana Aleksandrovna – PhD student, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dosy@belstu.by

Anikeenko Andrey Fedorovich − PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dosy@belstu.by

Поступила 07.04.2020

УДК 674.055:621.914.3

А. А. Гришкевич, С. А. Гриневич, Г. В. Алифировец
Белорусский государственный технологический университет

УВЕЛИЧЕНИЕ ПЕРИОДА СТОЙКОСТИ НОЖЕЙ ПРОФИЛЯТОРОВ ФРЕЗЕРНО-БРУСУЮЩИХ СТАНКОВ

В данной статье представлены результаты влияния изменения температуры ионно-плазменного азотирования на период стойкости ножей профиляторов фрезерно-брусующих станков.

Фрезерование – процесс резания вращающимися резцами, в котором траекторией резания является циклоида. Технологической целью фрезерования является преимущественно окончательное формирование поверхностей деталей.

Изучение процесса формирования технологической щепы и пилопродукции при обработке древесины на таких станках позволяет сделать процесс менее трудоемким и энергозатратным. Существенное влияние на энергопотребление процесса агрегатной переработки древесины оказывает качество подготовки и заточки режущего инструмента.

Одним из способов повышения полезного выхода пиломатериалов при обработке на фрезерно-брусующих станках является применение технологии профилирования пиломатериалов. Профилирование является наиболее экономичным способом производства пиломатериалов и позволяет за один проход получить обрезную основную и боковую продукцию. Фрезерно-профилирующая технология обеспечивает производительность фрезерно-брусующей линии и увеличивает полезный выход пилопродукции.

Процесс ионно-плазменного азотирования как эффективный метод повышения эксплуатационных свойств изделий из различных типов конструкционных и инструментальных сталей активно внедряется в современное производство. Благодаря своим уникальным возможностям, азотирование рассматривается как альтернативный метод цементации и карбонитрированию.

Ключевые слова: фрезерование, фреза, профилирование, азотирование, режимы.

A. A. Grischkevich, S. A. Grinevich, G. V. Alifirovets
Belarusian State Technological University

INCREASING THE PERIOD OF RESISTANCE OF KNIVES OF PROFILERS OF MILLING AND BRUSHING MACHINES

This article presents the results of the influence of changes in the temperature of ion-plasma nitriding on the period of stability of the knives of profilers of milling machines.

Milling is a process of cutting with rotating cutters, in which the cutting path is a cycloid. The technological purpose of milling is mainly to form the surfaces of parts in a consistent manner.

The study of the process of forming technological chips and saw products when processing wood on such machines makes the process less labor-intensive and energy-consuming. The quality of preparation and sharpening of the cutting tool has a significant impact on the energy consumption of the process of aggregate wood processing.

One of the ways to increase the useful yield of lumber when processing on milling and milling machines is the use of technology for profiling lumber. Profiling is the most economical way to produce lumber. Profiling technology allows you to get edged main and side products in one pass. Milling and profiling technology allows you to ensure the productivity of the milling and paving line and increase the useful output of saw products.

The nitriding process as an effective method of improving the performance properties of products made of various types of structural and tool steels is actively implemented in modern production. Due to its unique capabilities, nitriding is considered as an alternative method of cementation and carbonitrization.

Key words: milling, milling, profiling, nitriding, modes.

Введение. На сегодняшний день актуальной задачей в лесной и деревообрабатывающей промышленности является обеспечение более глубокой переработки древесины, снижение количества потерь древесины в стружку, повышение эффективности использования оборудования. Наиболее перспективным направлением решения поставленных задач считается использование технологии агрегатной переработки древесины. Основным оборудованием для агрегатной переработки древесины являются фрезерно-брусующие станки. Назначение фрезерно-брусующих станков – комплексная обработка бревна путем переработки удаляемой ча-

сти в технологическую щепу. Достоинства фрезерно-брусующих станков заключаются в простоте конструкции, надежности и высокой производительности.

В настоящее время на многих крупных предприятиях лесной и деревообрабатывающей отрасли Республики Беларусь установлены линии агрегатной переработки древесины, в состав которых входят брусующие и профилирующие узлы. Линии агрегатной переработки древесины состоят из нескольких узлов. Как правило, узел первого прохода предназначен для обработки окоренного бревна путем фрезерования горбыльной части с целью получения полубруса, технологической щепы и поворота полубруса вокруг своей оси на 90°. Узел второго прохода предназначен для фрезерования, профилирования и пиления полубруса. После обработки полубруса в узле второго прохода образуется брус и две боковые доски. Профилирование пиломатериалов представляет собой процесс механической обработки двух- или четырехкантных брусьев цилиндрическими фрезами с целью придания им ступенчатой формы, что в дальнейшем упрощает процесс переработки. Последующая распиловка ступенчатого бруса многопильным круглопильным станком позволяет получить обрезные пиломатериалы без применения специализированого оборудования (обрезных станков и рубительных машин), что значительно уменьшает энергоемкость процесса получения пиломатериалов и технологической щепы.

Профиляторы представляют собой фрезерные агрегаты, расположенные с двух сторон перерабатываемого материала и формирующие ступенчатую поверхность методом продольно-торцевого цилиндрического полузакрытого фрезерования.

Основная часть. Целью работы является изучение влияния температуры ионно-плазменного азотирования на период стойкости ножей профиляторов фрезерно-брусующих станков.

Технологическое оборудование лесопильного завода ОАО «Борисовский ДОК» предназначено для комплексной переработки пиловочных бревен диаметром 10–34 см (в вершинном срезе бревна) со скоростью до 45 м/мин.

На территории предприятия «Борисовский ДОК» установлена современная фрезерно-брусующая линия фирмы LINCK производства Германии, в состав которой входит фрезерно-пильный станок VPS (рис. 1).

Режущим инструментом фрезернопильной машины VPS 22 являются плоские ножи (рис. 2).

Промышленность Республики Беларусь не обеспечивает деревообрабатывающие предприятия страны инструментом для фрезерно-брусующих агрегатов. Поэтому актуальной задачей является разработка способов повышения периода стойкости дереворежущего инструмента для данного типа оборудования. Главным требованием является то, что упрочненный инструмент по своим характеристикам не должен уступать аналогам импортных производителей, таких как FABA (Польша), LEITZ и Leuco (Германия). Для реализации поставленной цели была изготовлена опытная партия ножей в количестве 8 штук.

Рис. 1. Фрезернопильный станок VPS

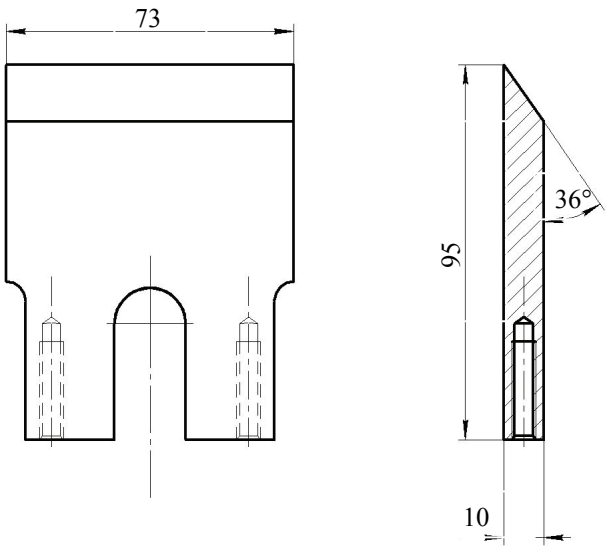


Рис. 2. Плоский нож

Для определения химического состава были взяты образцы материала импортных ножей и в центре физико-химических методов исследований БГТУ при помощи сканирующего электронного микроскопа JSM-5610 LV, оснащенного системой химического микроанализа EDX JED-2210, было установлено, что инструмент изготовлен из стали СТ6Х4М2ФС. Характеристики данного материала схожи с характеристиками

стали 8Х6НФТ, соответствующей ГОСТ 5950 «Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общие технические условия» [1]. Однако изготовленная партия ножей не соответствовала критериям поверхностной твердости, и коллективом автором совместно со специалистами ФТИ НАН Республики Беларусь было решено произвести их поверхностное упрочнение методом ионно-плазменного азотирования.

Ионно-плазменное азотирование (ИПА) – это разновидность химико-термической обработки инструмента, обеспечивающая диффузионное насыщение поверхностного слоя стали азотом или азотом и углеродом в азотно-водородной плазме при температуре 350–600°С.

Преимуществами ионно-плазменного азотирования являются [4]:

– более высокая поверхностная твердость азотированных деталей;

– отсутствие деформации деталей после обработки;

– повышение предела выносливости и увеличение износостойкости обработанных деталей;

– более низкая температура обработки, благодаря чему в стали не происходит структурных превращений;

– сохранение твердости азотированного слоя даже после нагрева до 600–650°С;

– возможность обработки изделий сложных форм;

– отсутствие загрязнения окружающей среды.

Для определения оптимальных режимов упрочнения методом ионно-плазменного азотирования было произведено упрочнение плоских ножей при температурах 400, 450 и 500°С. Остальные параметры: давление P = 60 Па, подача азота – 33 л/ч, подача водорода – 5 л/ч, время азотирования – 12 ч. В дальнейшем проводились промышленные испытания с обработанными таким образом ножами на ОАО «Борисовский ДОК» на фрезернопильной машине VPS 22.

Результаты испытаний показали, что ножи, упрочненные при температуре 400°С, переработали 400 м^3 древесины и радиус округления режущей кромки составил 436 мкм.

Ножи, упрочненные при температуре 450°С, переработали 1500 м^3 древесины и радиус округления режущей кромки составил 314 мкм. Ножи, упрочненные методом ионно-плазменного азотирования при температуре 500°С, переработали 2500 м^3 древесины и радиус округления режущей кромки составил 91 мкм. Для сравнения: ножи производства фирмы FABA переработали также 2500 м^3 древесины и радиус округления режущей кромки составил 85 мкм. Построим графические зависимости средней твердости образцов ножей от температуры ионно-плазменного азотирования и средней стойкости образцов ножей от их средней твердости. Зависимости приведены на рис. 3, 4.

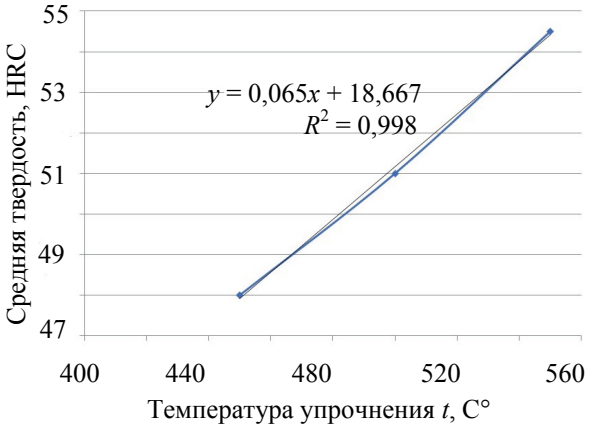


Рис. 3. Зависимость средней твердости образцов ножей от температуры ионно-плазменного азотирования

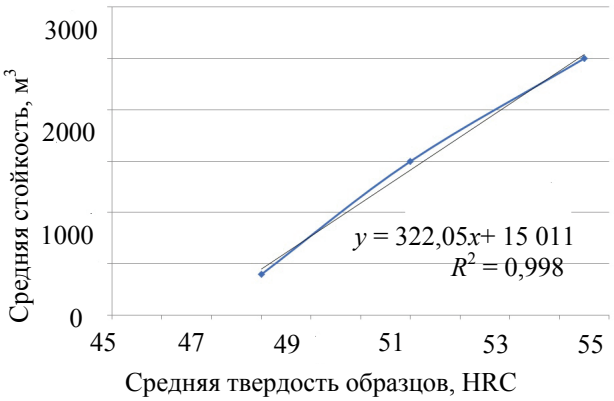


Рис. 4. Зависимость средней стойкости образцов ножей от их средней твердости после ионно-плазменного азотирования

На диаграммах, представленных на рис. 3 и 4, представлены также линии тренда с линейной аппроксимацией, выполненные в пакете Excel. Величины достоверности аппроксимации R^2 в первом случае составили 0,998, а во втором – 0,9948, что позволяет говорить о возможности линейной корреляции величин в рассматриваемом диапазоне.

Заключение. Таким образом, на основании проведенных исследований можем сделать следующие выводы:

– период стойкости ножей отечественного производства, упрочненных методом ионно-плазменного азотирования при температуре нагрева 550°С, сравним с периодом стойкости импортных ножей;

– зависимость средней твердости ножей от температуры ионно-плазменного азотирования может быть описана линейной функцией $y = 0{,}065x + 18{,}667$ с достоверностью аппроксимации 0,998;

– зависимость средней стойкости ножей, упрочненных методом ионно-плазменного азотирования, от их средней твердости ножей может быть описана линейной функцией $y = 322{,}05x + 15\,011$ с достоверностью аппроксимации 0,9948.

Список литературы

1. Раповец В. В. Комплексная обработка древесины фрезами со спиральным расположением сборных двухлезвийных ножей, обеспечивающая качество продукции и снижение энергозатрат: дис. … канд. техн. наук: 05.21.05. Минск, 2011. 187 с.

2. Боровиков Е. М., Фефилов Л. А., Шестаков В. В. Лесопиление на агрегатном оборудовании. М.: Лесная промышленность, 1985. 216 с.

3. Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общие технические условия: ГОСТ 5950. М.: Издательство стандартов, 2004. 146 с.

4. Влияние ионно-лучевого азотирования дереворежущего инструмента, изготовленного из быстрорежущей стали, на период его стойкости / А. В. Белый [и др.]. Минск: ФТИ НАН Беларуси, БГТУ, 2016. С. 185–187.

5. Адаптивный фрезерный инструмент и условие устойчивой его работы / А. А. Гришкевич [и др.] // Труды БГТУ. 2016. № 2 (184): Лесная и деревообрабатывающая промышленность. С. 275–280.

References

1. Rapovets V. V. *Kompleksnaya obrabotka drevesiny frezami so spiral'nym raspolozheniyem sbornykh dvukhlezviynykh nozhey, obespechivayushchaya kachestvo produktsii i snizheniye energozatrat. Dis. kand. tekhn. nauk* [Complex wood processing with mills with a spiral arrangement of two-blade prefab knives, ensuring product quality and reducing energy consumption. Dis. cand. tech. sciences]. Minsk, 2011. 187 p.

2. Borovikov E. M., Fefilov L. A., Shestakov V. V. *Lesopileniye na agregatnom oborudovanii* [Sawmilling on aggregate equipment]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1985. 216 p.

3. GOST 5950. Bars, strips and coils of tool alloy steel. General specifications. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 146 p. (In Russian)

4. Bely A. V., Garanin V. N., Grishkevich A. A, Anikeynko A. F. *Vliyaniye ionno-luchevogo azotirovaniya derevorezchushchego instrumenta, izgotovlennogo iz bystrorezchushchey stali, na period ego deystviya* [The Influence of ion-beam nitriding of wood -cutting tools made of high- speed steel on the period of its resistance]. Minsk, FTI NAN Belarusi Publ., BGTU Publ., 2016. P. 185–187.

5. Grishkevich A. A., Vikhrenko V. S., Garanin V. N., Anikeenko A. F. Adaptive milling tool and the condition of its stable work. *Trudy BGTU* [Proceedings of BGTU], series 2, Forest and Woodworking Industry, 2016, no. 2, pp. 275–280 (In Russian).

Информация об авторах

Гришкевич Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dosy@belstu.by

Гриневич Сергей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: gres410a@ya.ru

Алифировец Григорий Васильевич – заведующий лабораторией кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: alifirovez@tut.by

Information about the authors

Grishkevich Aleksandr Aleksandrovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dosy@belstu.by

Grinevich Sergey Anatol'yevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gres410a@ya.ru

Alifirovets Grigoriy Vasil'yevich – Head of the laboratory, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alifirovez@tut.by

Поступила 12.03.2020

УДК 674.914:674.338

И. К. Клепацкий, В. В. Раповец
Белорусский государственный технологический университет

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ НОЖЕЙ В АГРЕГАТНОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ДРЕВЕСИНЫ

В данной статье приведены результаты промышленной апробации модифицированных дереворежущих ножей торцово-конических фрез фрезерно-брусующего станка и выполнен их анализ.

Объектами исследования являлись методики модифицирования поверхностных слоев лезвийного инструмента, изготовленного из легированных сталей, при агрегатной обработке древесины.

Основное направление проводимых исследований состоит в определении потери режущей способности после модификации поверхности режущих инструментов для агрегатной переработки древесины. Характеристика процесса потери режущей способности предопределяет необходимость упрочнения режущего инструмента в зонах с активным износом, так как за их границами свойства материала не играют роли в затуплении инструмента. С точки зрения экономии материальных, трудовых и энергетических ресурсов упрочняющей обработке по улучшению свойств материала следует подвергать только локальную поверхность инструмента, непосредственно участвующую в резании.

В промышленных условиях были проведены экспериментальные исследования динамики технологической стойкости лезвий дереворежущих ножей из легированной стали 6ХС, установленных взамен ножей базового комплекта из стали 40Х10С2М зарубежного производства (производитель – Faba, Польша), эксплуатируемых на фрезерно-пильном станке VPS 22, входящем в состав линии агрегатной переработки древесины LINK, предприятия ОАО «Борисовский ДОК».

По результатам промышленной апробации были установлены методики упрочнения ножей, которые позволили добиться результатов технологической стойкости, равных и превосходящих по стойкости ножи импортного производства (период технологической стойкости увеличен до 20% в сравнении с ножами, эксплуатируемыми на предприятии).

Ключевые слова: нож, износ, динамика, агрегатная обработка, стойкость, эксперимент, производство.

I. K. Klepatski, V. V. Rapovets
Belarusian State Technological University

INDUSTRIAL TESTS OF MODIFIED KNIVES IN THE AGGREGATE PROCESSING OF WOOD

This article presents the results of industrial testing of modified wood-cutting knives of face-conical mills of a milling and chipper machine and their analysis is carried out.

The objects of study were methods of modifying the surface layers of a blade tool made of alloy steels during the aggregate processing of wood-blue.

The main goal of the research is to determine the dynamics of technological resistance after surface modification of cutting tools for aggregate processing of wood. The characteristic of the process of loss of cutting ability determines the need for hardening of the cutting tool in areas with active wear, since beyond their boundaries the material properties do not play a role in blunting the tool. From the point of view of saving material, labor and energy resources, only the local surface of the tool directly involved in cutting should be subjected to hardening treatment to improve the properties of the material.

In industrial conditions, experimental studies were carried out on the dynamics of the technological resistance of blades of wood-cutting knives made of 6XC alloy steel installed instead of knives of a basic set of 40X10C2M steel of foreign manufacture (manufactured by – Faba, Poland), operated on a VPS 22 milling and sawing machine, included with the structure of the LINK aggregate wood processing line by the “Borisovsky DOK”.

Based on the results of industrial testing, methods for hardening knives were established, which made it possible to achieve technological resistance equal and superior to that of imported knives (the period of technological resistance was increased to 20% compared to the knives operated at the enterprise).

Key words: knife, wear, dynamics, aggregate processing, resistance, experiment, production.

Введение. В Беларуси и других странах к настоящему времени проведен ряд научных исследований по вопросам улучшения работы агрегатного оборудования. Целью проводимых исследований является определение динамики технологической стойкости ножей для агрегат-

ной переработки древесины. Постоянно возрастающие требования к качеству продукции из древесины, рациональное использование древесного сырья требуют новых разработок, направленных на совершенствование агрегатного оборудования.

Традиционно режущий инструмент фрезерно-брусующих станков изготавливают из различных инструментальных сталей, например, углеродистой стали У8А, инструментальных легированных сталей 6ХС и 9ХС повышенной прокаливаемости, применяются высоколегированные стали марок 4Х5МФ, 55Х6В3СМ и 55Х7ВСМФ [1–6]. Для фрезерно-брусующих станков также применяются различные методики увеличения технологической стойкости режущего инструмента [7].

Основная часть. Нами была изготовлена опытная партия ножей торцово-конических фрез из стали 6ХС, конструкции, аналогичной импортной (производства Faba, Польша, сталь 40Х10С2М), выбранной на основании ранее проведенных исследований [6–9]. Ножи были подвергнуты различным методам поверхностной модификации, позволяющим повысить их технологическую стойкость: термическая обработка (ТО), комбинация ТО и магнитно-импульсной обработки (МИО), а также ТО и ионно-вакуумного азотирования (ИВА).

Технологические параметры проведения промышленных испытаний в условиях производства ОАО «Борисовский ДОК» следующие: фрезерно-брусующая машина второго ряда VSP22 в составе линии агрегатной переработки древесины LINK (Германия), материал обработки – древесина хвойных пород [9] (сосна, ель; соотношение, %, состава пород 93/7 соответственно); объем обработки – 2100 м^3; время работы – 40 ч; скорость подачи – 36 м/мин; частота вращения фрез – 800 мин$^{-1}$.

За время проведения опытно-промышленных испытаний на участок переработки поступала древесина с большим диапазоном влажности (20–45%) и наличием абразивных элементов, что негативно сказывалось на работоспособности дереворежущего инструмента по сравнению с обработкой чистой и более однородной по влажности свежесрубленной древесины.

Фотографии режущей кромки ножей и максимального радиуса округления по длине рабочей части ножа, а также численное его значение (ρ_{max}, мкм) после испытания будут приведены под описанием методов поверхностной модификации.

Методом слепков [9] определялся радиус округления ρ, мкм, режущей кромки (рис. 1).

Часть из комплекта ножей подверглись термической обработке – закалке с температурой 750°С. После ТО твердость составила 56 HRC.

Результаты измерений радиусов округления режущей кромки ρ_n, мкм, опытного образца за 5 смен (n) работы (одна смена длится 8 ч) приведены в табл. 1.

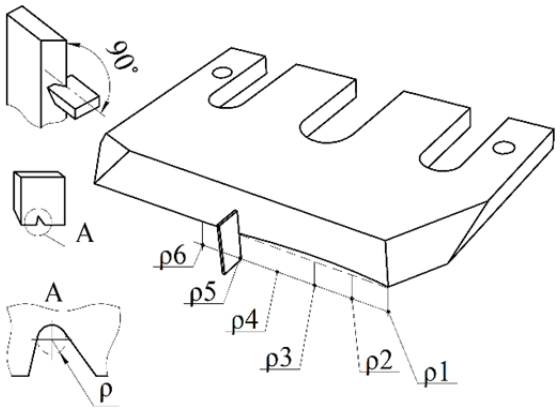


Рис. 1. Метод слепков

Таблица 1

Результаты измерений (ТО)

Радиус округления после n смен работы	Смены				
	1	2	3	4	5
ρ_1, мкм (1 мм от края кромки	38	63	79	98	133
ρ_2 (15 мм)	39	65	79	102	139
ρ_3 (30 мм)	36	61	74	95	124
ρ_4 (45 мм)	28	49	60	66	83
ρ_5 (60 мм)	17	29	36	43	58
ρ_6 (72 мм)	8	9	16	23	33

Часть ножей из стали 6ХС подвергалась модификации методом МИО с величиной энергии 8 кДж. Твердость поверхности образца по результату модификации составила 57 HRC.

Результаты измерений ρ_n, мкм, режущей кромки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений (ТО + МИО)

Радиус округления после n смен работы	Смены				
	1	2	3	4	5
ρ_1, мкм (1 мм от края кромки)	38	65	81	94	117
ρ_2 (15 мм)	37	66	79	95	122
ρ_3 (30 мм)	35	61	71	88	105
ρ_4 (45 мм)	26	46	56	61	69
ρ_5 (60 мм)	16	27	33	40	49
ρ_6 (72 мм)	9	10	15	22	29

Поверхность части ножей модифицировали в камере вакуумно-плазменной установки [4], в среде N-H-Ar при температуре 390°С и времени выдержки 12 ч. Твердость после проведенной модификации ИВА составила 50 HRC.

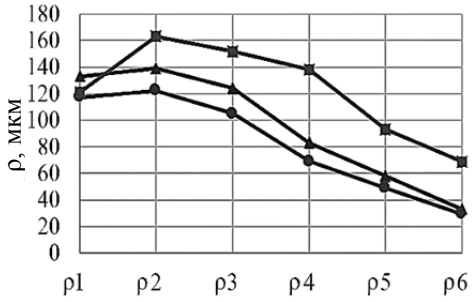
Результаты измерений ρ_n, мкм, режущей кромки приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерений (ТО + ИВА)

Радиус округления после *n* смен работы	Смены				
	1	2	3	4	5
ρ_1, мкм (1 мм от края кромки)	121	–	–	–	–
ρ_2 (15 мм)	163	–	–	–	–
ρ_3 (30 мм)	152	–	–	–	–
ρ_4 (45 мм)	138	–	–	–	–
ρ_5 (60 мм)	93	–	–	–	–
ρ_6 (72 мм)	69	–	–	–	–

Аварийный износ кромки (рис. 2, график ТО + ИВА) может говорить о нарушении технологии упрочнения инструмента и о необходимости дальнейшего изучения процессов упрочнения методом ионно-вакуумного азотирования.



▲ – ТО; ● – ТО + МИО; ■ – ТО + ИВА

Рис. 2. Сравнительный график изменения радиуса округления режущей кромки по ее длине в зависимости от метода обработки

Заключение. Характеристика процесса потери режущей способности предопределяет необходимость упрочнения режущего инструмента в зонах с активным износом, так как за их границами свойства материала не играют роли в затуплении инструмента. С точки зрения экономии материальных, трудовых и энергетических ресурсов упрочняющей обработке по улучшению свойств материала следует подвергать только локальную поверхность инструмента, непосредственно участвующую в резании. По результатам проведенных производственных испытаний на ОАО «Борисовский ДОК» были получены следующие результаты:

1. Комплект ножей, упрочненных ТО + ИВА, не подтвердил свою эффективность, отработав лишь 4 ч, при этом полностью потеряв режущую способность (250 м^3 круглых лесоматериалов) древесины сосны. При этом максимальный радиус округления режущей кромки ρ_{max} составил 163 мкм. Необходимо дальнейшее изучение режимов обработки поверхности металла для направления деревообработки на фрезерно-брусующих станках.

2. Лучшую технологическую стойкость, по сравнению с комплектом ножей, упрочненных ТО, показали ножи, упрочненные термическим способом, отработав 40 ч (2100 м^3) и при этом ρ_{max} = 180 мкм (усредненный показатель технологической стойкости ножей, используемых на предприятии, – ρ_{max} = 178 мкм).

3. Самый высокий показатель технологической стойкости у ножей, обработанных по технологии МИО + ТО, – ρ_{max} = 156 мкм – 40 ч работы (2100 м^3).

Различные способы упрочнения ножей позволили добиться результатов технологической стойкости, равных и превосходящих по стойкости ножи импортного производства (увеличена на 20%). Из этого можно сделать вывод, что ножи соответствуют эксплуатационным требованиям и могут быть рекомендованы для использования на отечественных деревообрабатывающих предприятиях, применяющих подобную технологию переработки древесины хвойных пород.

Список литературы

1. Wood chip physical quality definition and measurement / F. Ding [et. al.] // Pulp & Paper Canada. 106:2. 2005. P. 27–32.

2. Боровиков Е. М., Фефилов В. В., Шестаков Л. А. Лесопиление на агрегатном оборудовании. М.: Лесная промышленность, 1985. 216 с.

3. Раповец В. В., Гриневич С. А., Бурносов Н. В. Конструкция и расчеты фрезерно-брусующих станков. Минск: БГТУ, 2015. 82 с.

4. Glow discharge assisted low-temperature nitriding of knives used in wood processing / A. Sokołowska [et. al.] // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2009. Vol. 37. Issue 2. P. 690–693.

5. Таратин В. В., Фефилов Л. А., Боричев Ю. А. Совершенствование малоножевых торцово-конических фрез агрегатного лесопильного оборудования // Станки и инструменты деревообрабатывающих производств. Межвузовый сборник научных трудов СПбЛТА. СПб.,1993. С. 93–97.

6. Раповец В. В. Комплексная обработка древесины фрезами со спиральным расположением сборных двухлезвийных ножей, обеспечивающая качество продукции и снижение энергозатрат: дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2011. 206 с.

7. Клепацкий И. К. Эффективные методы повышения технологической стойкости ножей для агрегатной переработки древесины // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2018. № 1. С. 190–195.

8. Повышение эксплуатационных свойств дереворежущих ножей комбинированным методом нанесения вакуумных упрочняющих покрытий и магнитно-импульсной обработки / А. В. Алифанов [и др.] // Литье и металлургия. 2014. № 2. С. 95–100.

9. Клепацкий И. К. Динамика потери режущей способности лезвий малоножевых фрез при агрегатной переработке древесины // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2019. № 2. С. 190–195.

References

1. Ding F., Benaoudia M., Bédard P., Lanouette R., Lejeune C., Gagné P. Wood chip physical quality definition and measurement. *Pulp & Paper Canada*, 106:2, 2005, pp. 27–32.

2. Borovikov E. M., Fefilov L. A., Shestakov V. V. *Lesopileniye na agregatnom oborudovanii* [Sawmilling on aggregate equipment]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1985. 216 p.

3. Rapovets V. V., Grinevich S. A., Burnosov N. V. *Konstruktsiya i rashchety frezerno-brusuyushchikh stankov* [Construction and calculations of chipper cutter machines]. Minsk, BGTU Publ., 2015. 82 p.

4. Sokołowska A., Rudnicki J., Wnukowski E., Beer P., Wierzchoń T., Kurzydłowski K. J. Glow discharge assisted low-temperature nitriding of knives used in wood processing. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2009, vol. 37, issue 2, pp. 690–693.

5. Taratin V. V., Fefilov L. A., Borichev Yu. A. Improvement of low-blade butt-and-conic cutters of aggregate sawing equipment. *Mezhvuzovyy sbornik nauchnykh trudov SPbLTA: Stanki i instrumenty* [Interuniversity collection of scientific works of SPbLTA: Woodworking machinery and tools]. St. Petersburg, 1993, pp. 93–97.

6. Rapovets V. V. *Kompleksnaya obrabotka drevesiny frezami so spiral'nym raspredeleniyem sbornykh dvukhlezviynykh nozhey, obespechivayushchaya kachestvo energozatrat. Dis. kand. tekhn. nauk* [Complex processing of wood with mills with a spiral arrangement of prefabricated two-blade knives, ensuring product quality and reducing energy costs. Cand. Diss.]. Minsk, 2011, 206 p.

7. Klepatsky I. K. Effective methods for improving the technological stability of knives for aggregate wood processing. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forestry. Nature management. Processing of renewable resources, 2018, no. 1, pp. 190–195 (In Russian).

8. Alifanov A. V., Demyanchik A. S., Lyah A. A., Milukova A. M. Improving the performance properties of wood-cutting knives by the combined method of applying vacuum hardening coatings and magnetic-pulse processing. *Lit'ye i metallurgiya* [Casting and metallurgy], 2014, no. 2, pp. 95–100 (In Russian).

9. Klepatsky I. K. Dynamics of loss of cutting ability of Blades of small-cutter mills during aggregate processing of wood. *Trudy BGTU* [Proceeding of BSTU], series 1, Forestry. Nature management. Processing of renewable resources, 2019, no. 1, pp. 190–195 (In Russian).

Информация об авторах

Клепацкий Игорь Казимирович – аспирант кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lucky-35@mail.ru

Раповец Вячеслав Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: slavyan_r@mail.ru

Information about the authors

Klepatski Ihar Kazimirovich – PhD student, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lucky-35@mail.ru

Rapovets Vyacheslav Valeryevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: slavyan_r@mail.ru

Поступила 12.03.2020

УДК 674.914:674.338

В. В. Раповец[1], С. В. Медведев[2], И. К. Клепацкий[1]
[1]Белорусский государственный технологический университет
[2]Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ВЫСОКОЙ ДЕТАЛИЗАЦИЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В данной статье сформированы обоснованные граничные условия суперкомпьютерных предварительных расчетов, разработана и предложена к использованию методика проведения вычислительных экспериментов с использованием механизма дискретных частиц по виртуальному резанию древесного анизотропного материала выбранным типом фрезерного инструмента. Представлены корректные геометрические и конечно-элементные модели с высокой детализацией анизотропного обрабатываемого древесного материала и перспективной фрезы с наноразмерной режущей вставкой, создающей предпосылки для реализации процессов самозатачивания инструмента в процессе работы.

Рассмотрены подходы отражения анизотропных свойств древесных материалов в вычислительных суперкомпьютерных экспериментах, которые требуют более детального рассмотрения. Предложенная методика проведения вычислительных экспериментов ставит целью работы выявить зависимости характеристик процесса резания от высокоскоростных режимов и позволяет исследовать параметры режимов обработки, учитывая изменение физико-механических свойств от сердцевинной части к заболонной при изменении ее относительной влажности, а также изменение трехмерного напряженно-деформированного состояния древесины после удаления влаги в структуре древесины (сушке). Полученные результаты исследований являются основой для моделирования высокоскоростных процессов лезвийной обработки древесных материалов, при определении значимых выходных технологических параметров для деревообрабатывающих предприятий Республики Беларусь.

Ключевые слова: моделирование, механическая обработка, древесный материал, фреза, вычислительный эксперимент, конечно-элементная модель, производство.

V. V. Rapovets[1], S. V. Medvedev[2], I. K. Klepatski[1]
[1]Belarusian State Technological University
[2]United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus

INDUSTRIAL TESTS OF MODIFIED KNIVES IN THE AGGREGATE PROCESSING OF WOOD

In this article, reasonable boundary conditions for supercomputer preliminary calculations are formed, a methodology for conducting computational experiments using the mechanism of discrete particles for virtual cutting of wood anisotropic material with the selected type of milling tool is developed and proposed. Correct geometric and finite element models with high detail of anisotropic processed wood material and a perspective cutter with a nano-sized cutting insert, which creates the prerequisites for the implementation of self-sharpening tools in the process, are presented.

Approaches to reflecting the anisotropic properties of wood materials in computational supercomputer experiments, which require a more detailed consideration, are considered. The proposed methodology for conducting computational experiments to identify the dependences of the characteristics of the cutting process on high-speed modes allows us to study the parameters of the processing modes, taking into account the change in the physicomechanical properties from the heart-wine part to the sap portion with a change in its relative humidity, as well as a change in the three-dimensional stress-strain state of wood after removing moisture in the wood structure (drying). The obtained research results are the basis for modeling high-speed processes of blade processing of wood materials, when determining significant output technological parameters for woodworking enterprises of the Republic of Belarus.

Key words: modeling, machining, wood material, mill, computational experiment, finite element model, production.

Введение. Эксплуатация дорогого импортного оборудования и фрезерного инструмента на деревообрабатывающих производствах Республики Беларусь для обработки материалов на основе древесины в каркасах, фасадах мебели и строительных изделий, повышение требований к условиям работы высокопроизводительных машин требуют оптимизации деревообработки,

параметров конструкций режущих инструментов. В качестве критериев оптимизации таких технологических процессов наиболее часто используются производительность, энергоемкость, себестоимость изделия, обработки и др.

Для получения выходных данных и построения обозначенных закономерностей проводятся длительные лабораторные и производственные эксперименты с последующим анализом большой базы полученных данных. В связи с этим снижение затрат энергетических и материальных ресурсов, сокращение времени на проведение натурных экспериментов за счет моделирования и оптимизации параметров сложных высокоскоростных процессов при механической обработке фрезерным инструментом с применением суперкомпьютерных вычислительных технологий является актуальной задачей. Методы оптимизации высокоскоростных процессов фрезерования древесины и древесных материалов с использованием полученных закономерностей [1] должны обеспечивать требуемые характеристики производительности, себестоимости, энергоемкости и качества продукции и быть устойчивыми к влиянию неопределенных факторов.

Основная часть. Для совершенствования и оптимизации высокоскоростных процессов фрезерования анизотропных материалов (древесины и древесных материалов), параметров эксплуатируемого режущего инструмента и технологических режимов обработки необходимо моделирование с высокой степенью детализации результатов и построение основных технико-экономических характеристик таких процессов с возможностью их использования в современных деревообрабатывающих машинах на производстве [2, 3].

В результате выполненных научных исследований разработаны геометрические и конечно-элементные модели обрабатываемого анизотропного материала и режущего инструмента с использованием механизма дискретных частиц, проведены предварительные суперкомпьютерные вычислительные эксперименты в мультипроцессорной среде LS-DYNA [4].

Процесс моделирования в подобных вычислительных средах позволяет обозначить несколько подходов отражения анизотропных свойств древесных материалов в вычислительных суперкомпьютерных экспериментах, которые требуют более детального рассмотрения. Удается выделить как минимум три не альтернативных подхода:

1) первый подход базируется на достаточно сложном описании модели материала пакета LS-DYNA – MAT_WOOD_ {OPTION};

2) суть второго подхода в следующем: анизотропия механических свойств может воспроизводиться за счет создания своего рода «слоеного пирога», в котором по известным закономерностям изменяются свойства внутренних и наружных слоев обрабатываемого древесного образца древесины;

3) третий подход заключается в предположении одинаковых механических свойств образца древесины. Анизотропия в известной степени может воссоздаваться приложением внешних уравновешенных сил к необрабатываемым поверхностям. Эти силы практически эквивалентны силам, возникающим при просушивании древесины, приводящим к ее растрескиванию, короблению и формированию внутреннего напряженного-деформированного состояния.

Вычислительные суперкомпьютерные эксперименты на параллельных архитектурах СКИФ выполнялись в лицензионном пакете нелинейного динамического анализа LS-DYNA [5].

Первоначально трехмерная геометрическая твердотельная модель эффективной фрезы для обработки натуральной древесины и древесных материалов сформирована в пакете Solid Works (рис. 1). Построена модель фрезерного инструмента (ножа) с наноразмерной вставкой из тугоплавкого износостойкого материала, обеспечивающей в процессе работы эффект самозатачивания.

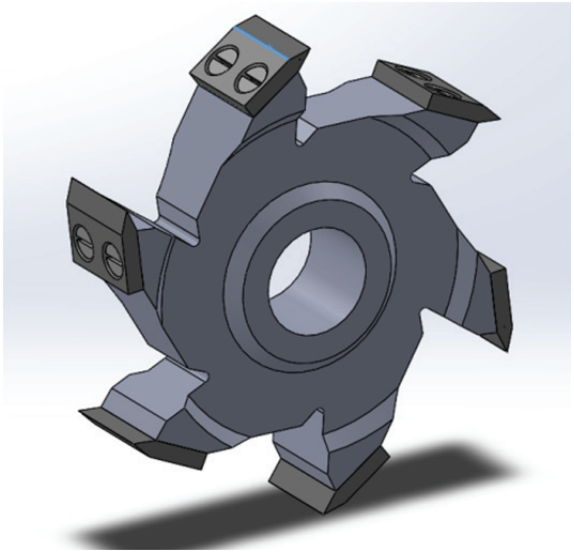


Рис. 1. Трехмерная геометрическая твердотельная модель эффективной фрезы, сформированная в пакете Solid Works

В геометрическую модель фрезы с целью ее конструктивного упрощения при выполнении последующих расчетов в пакете LS-DYNA авторами внесены определенные изменения. Это обеспечило возможности формирования корректных конечно-элементных моделей обрабатываемого анизотропного материала и режущего инструмента (рис. 2, 3) [1].

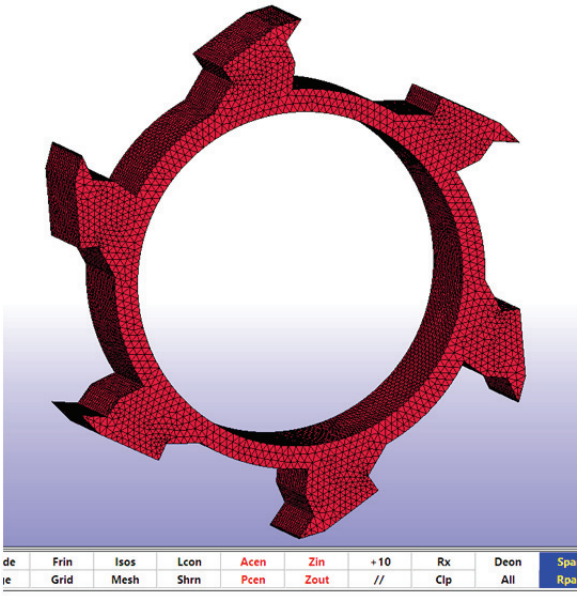


Рис. 2. Конечно-элементная модель фрезерного инструмента

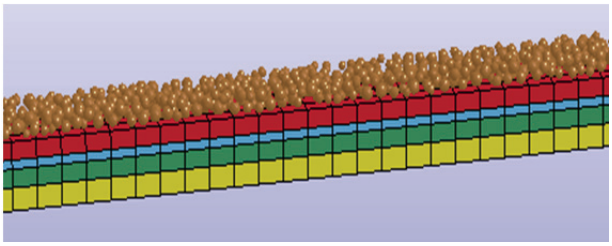


Рис. 3. Конечно-элементная модель обрабатываемого древесного материала (верхний слой представлен набором дискретных частиц)

На специальном языке описания пакета LS-DYNA указывались следующие карты:

– для инициализации дискретных частиц: *CONTROL_DISCRETE_ELEMENT;

– для указания части модели, использующей дискретные частицы: *PART, *SECTION_SOLID, *MAT_ELASTIC;

– для инициализации геометрических объемов, в которых дискретные частицы будут взаимодействовать с моделями фрезы и режущей пластины: *DEFINE_BOX, *DEFINE_DE_ACTIVE_REGION, *DEFINE_DE_BOND;

– карта изменения во времени скорости горизонтальной подачи древесного материала при встречном фрезеровании: *DEFINE_CURVE;

– карта изменения во времени угловой скорости вращения фрезы при встречном фрезеровании древесины: *DEFINE_CURVE;

– карта воздействия сил гравитации на все элементы трехмерной динамической сцены: *DEFINE_CURVE_TITLE.

В проведенных вычислительных суперкомпьютерных экспериментах удалось эффективно совместить макроразмеры фрезы и обрабатываемой заготовки с микроразмерами режущей пластины и параметрами дискретных частиц, использование которых особенно эффективно на параллельных вычислительных архитектурах [6, 7, 8].

В результате выполненных суперкомпьютерных экспериментов на параллельных архитектурах СКИФ в лицензионном пакете нелинейного динамического анализа LS-DYNA по созданным моделям получены верифицированные значения сил резания (давления) на поверхностях ножа, значения мощности резания, параметры технологической стойкости лезвия при обработке древесины как анизотропного материала (рис. 4, 5) [9]. Представленные результаты могут быть использованы для построения математических моделей и разработки методов оптимизации и адаптивного управления параметрами технологических процессов высокоскоростной механической обработки древесных материалов, позволяющих прогнозировать рациональные режимы резания и конструкции ресурсосберегающего инструмента.

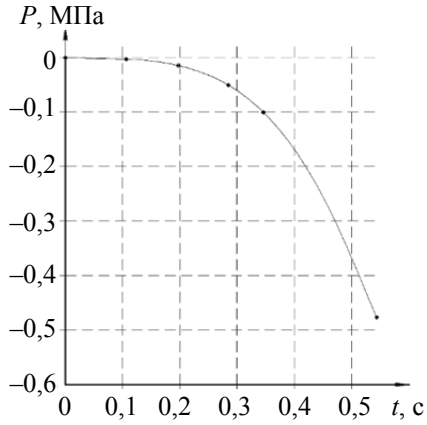


Рис. 4. График изменения во времени давления (усилий резания, мощности) на режущих поверхностях ножа фрезы

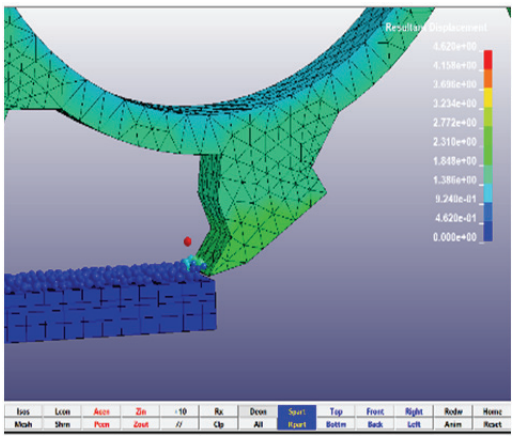


Рис. 5. Динамическое взаимодействие фрезы с моделью древесного материала, представленного набором дискретных частиц

Динамическое взаимодействие модели фрезы с моделью древесного материала, представленного набором дискретных частиц, показано на рис. 5.

В качестве вычислительных суперкомпьютерных ресурсов использовались кластеры СКИФ – GPU-NEXT, СКИФ – GEO – Office, а также самый высокопроизводительный на данный момент в Республике Беларусь кластер СКИФ – GEO – ЦОД.

Из проведенных вычислительных основных и дополнительных экспериментов напрашивается вывод о влиянии величины крутящего момента на параметры, определяющие энергетические затраты процесса высокоскоростной обработки древесных материалов. Усилия резания имеют определенную тенденцию к снижению при возрастании крутящего момента на исполнительном режущем инструменте.

Заключение. Полученные результаты могут использоваться для моделирования и оптимизации параметров сложных высокоскоростных процессов механической обработки древесины и древесных материалов при выполнении научных исследований, что позволит существенно повысить эффективность действующего деревообрабатывающего производства.

Данный вывод заслуживает особого внимания, т. к. может открыть новое направление в совершенствовании процесса резания практически без дополнительных затрат, связанных с геометрическими и прочностными характеристиками современных режущих твердосплавных и иных пластин с упрочненными поверхностями. Требуются дополнительные теоретические, вычислительные и экспериментальные работы для подтверждения (или опровержения) найденного эффекта. Допускаем, что дополнительный углубленный анализ цикла работ немецких коллег по экспериментальному определению рациональных режимов резания может быть весьма полезен в данном случае.

Представленные результаты исследований являются основой для моделирования высокоскоростных процессов лезвийной обработки древесных материалов при определении значимых выходных параметров для предприятий ОАО «Речицадрев», ЗАО «Молодечномебель», филиал «Вилейская мебельная фабрика» и других деревообрабатывающих предприятий.

Список литературы

1. Методика моделирования процесса механической обработки древесных материалов фрезерованием в пакете LS-DYNA / В. В. Раповец [и др.] // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: Труды X международного евразийского симпозиума. Екатеринбург, 2015. С. 170–176.

2. Huang J. M., Black J. T. An Evalution of Chip Separation Criteria for FEM Simulation of Machining // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 1996. P. 545–554.

3. Ceretti E., Fallbohmer P., Wu W. T., Atlan T. R. Application of 2D FEM to Chip Formation in Orthogonal Cutting // Journal of Materials Processing Technology. 1996. P. 169–180.

4. Вычислительные эксперименты высокоскоростной лезвийной обработки древесины / В. В. Раповец [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2017. № 2. С. 360–364.

5. LS-DYNA: keyword user's manual // Livermore Software Technology Corporation. Jan. 2007. Vol. 971. 2196 p.

6. Totis G., Albertelli P., Monno M. Efficient Evaluation of Process Stability in Milling With Spindle Speed Variation by Using the Chebyshev Collocation Method // J. Sound Vib. 2014. No. 333(3). P. 646–668.

7. Пантелеев А. В., Летова Т. А. Методы оптимизации в примерах и задачах: учеб. пособие. М.: Высш. шк., 2005. 544 с.

8. Kiss A. K., Bachrathy D., Gabor S. Effects of Varying Dynamics of Flexible Workpieces in Milling Operations // Journal of Manufacturing Science and Engineering. Jan 2020. No. 142 (1). P. 144–155.

9. Раповец В. В. Методика расчета мощности в программной среде LS-DYNA через мгновенные значения сил и скоростей резания при фрезеровании древесины // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2018. № 2 (210). С. 290–295.

References

1. Rapovets V. V., Grishkevich A. A., Medvedev S. V., Ivanec G. G. The methodology of modeling during machining of wood materials by milling in the soft LS-DYNA. *Derevoobrabotka: tekhnologii, oborudovaniye: menedzhment XXI veka: Trudy X mezhdunarodnogo evraziyskogo simpoziuma* [Woodworking: technologies, equipment, management of the XXI Century: Proceedings of the X International. Evraz. Symposium], Ekaterinburg, 2015, pp. 170–176 (In Russian).

2. Huang J. M., Black J. T. An Evalution of Chip Separation Criteria for FEM Simulation of Machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1996, pp. 545–554.

3. Ceretti E., Fallbohmer P., Wu W. T., Atlan T. R. Application of 2D FEM to Chip Formation in Orthogonal Cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, pp. 169–180.

4. Rapovets V. V., Klepatski I. K., Medvedev S. V., Ivanec G. G. Computational experiments of high-speed blade cutting of wood. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 2, Forest and Woodworking Industry, 2017, pp. 360–364 (In Russian).

5. LS-DYNA: keyword user's manual. *Livermore Software Technology Corporation*, jan. 2007, vol. 971. 2196 p.

6. Totis G., Albertelli P., Monno M. Efficient Evaluation of Process Stability in Milling With Spindle Speed Variation by Using the Chebyshev Collocation Method. *J. Sound Vib*., 2014, no. 333 (3), pp. 646–668.

7. Panteleev A. V., Letova T. A. *Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh: ucheb. posobiye* [Optimization methods in examples and tasks: textbook. Allowance]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2005. 544 p.

8. Kiss A. K., Bachrathy D., Gabor S. Effects of Varying Dynamics of Flexible Workpieces in Milling Operations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Jan 2020, no. 142(1), pp. 144–155.

9. Rapovets V. V., Klepatski I. K., Medvedev S. V., Ivanec G. G. The methodology for calculating power in the LS-DYNA software environment through instantaneous values of cutting forces and speeds during wood milling. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forest and Woodworking Industry, 2018, pp. 290–295 (In Russian).

Информация об авторах

Раповец Вячеслав Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: slavyan_r@mail.ru

Медведев Сергей Викторович – доктор технических наук, заведующий лабораторией. Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6, Республика Беларусь). E-mail: medv@newman.bas-net.by

Клепацкий Игорь Казимирович – аспирант кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lucky-35@mail.ru

Information about the authors

Rapovets Vyacheslav Valeryevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: slavyan_r@mail.ru

Medvedev Sergey Viktorovich – DSc (Engineering), Head of the Laboratory. The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganova str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: medv@newman.bas-net.by

Klepatski Ihar Kazimirovich – PhD student, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lucky-35@mail.ru

Поступила 12.03.2020

УДК 674.914:674.338

С. А. Гриневич, А. А. Гришкевич, Д. С. Волкович
Белорусский государственный технологический университет

К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КРУГЛОПИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В работе рассмотрен вопрос обеспечения безопасной эксплуатации круглопильного оборудования для продольной распиловки древесины. Актуальность вопроса продиктована высоким уровнем травматизма на станках данного типа, в том числе со смертельным исходом. Основным травмирующим фактором является обратный выброс заготовки, что связано с особенностями процесса механической обработки древесины, а именно с использованием схемы встречного пиления, при которой силы сопротивления подачи довольно значительны. Вероятность обратного выброса заготовки увеличивается при отсутствии расклинивающих ножей или при попытке изменить положение заготовки во время обработки. Для снижения риска травмирования обслуживающего персонала в круглопильных станках для продольной распиловки используются противовыбрасыватели (когтевые завесы).

В работе рассмотрены требования технических нормативно-правовых актов, предъявляемые к углу заклинивания когтевых завес, и продемонстрировано существенное расхождение в рекомендациях. Получено математическое выражение, характеризующее условие срабатывания когтевой завесы и захват заготовки. Установлено, что основными факторами, влияющими на эффективность работы когтевой завесы, являются: коэффициент трения заготовки по столу, коэффициент трения когтевой завесы по поверхности заготовки и угол заклинивания. В работе исследовано влияние каждого из этих факторов, построены графические зависимости, позволяющие визуально оценить характер и степень влияния каждого из них. Изучено влияние угла заклинивания на сумму сил трения. Предложены мероприятия по повышению эффективности работы когтевых завес. Однако представленная работа не является исчерпывающей в данном направлении, поскольку условие заклинивания было записано для затупленной кромки противовыбрасывателей и не учитывает возможность внедрения когтей завесы в обрабатываемый материал, что является перспективным направлением дальнейших исследований.

Ключевые слова: когтевая завеса, пластина, заклинивание, коэффициент трения.

S. A. Grinevich, A. A. Grishkevich, D. S. Volkovich
Belarusian State Technological University

ON THE ISSUE OF ENSURING SAFETY AT THE USAGE OF CIRCULAR SAW EQUIPMENT

The paper considers the issue of ensuring safe operation of circular sawing equipment for longitudinal sawing of wood. The relevance of the issue is dictated by the high level of injuries on this type machines, including fatal ones. The main traumatic factor is the reverse ejection of a billet, which is due to the peculiarities of mechanical processing of wood, namely, using a counter-sawing scheme, in which the feed resistance forces are quite significant. The probability of reverse ejection of the workpiece increases when wedging knives are absented or when trying to change the position of the workpiece during processing. To reduce the risk of service personnel injury circular sawing machines use counter-throwers (claw curtains).

The paper considers the requirements of technical regulations for the jam angle of claw curtains and demonstrates a significant discrepancy in the recommendations. A mathematical expression that characterizes the condition for claw curtain trigger and capture of a workpiece is obtained. It is established that the main factors affecting of the claw curtain efficiency are: the coefficient of friction between a workpiece and a table, the coefficient of friction between a claw curtain and a surface of the workpiece and the jam angle. The paper studies the influence of each of these factors and builds graphical dependencies that allow us to visually assess the nature and degree of influence each of them. The influence of the jam angle on the sum of the friction forces is studied. Measures to improve the efficiency of claw curtains are proposed. However, the presented work is not exhaustive in this direction, since the jamming condition was recorded for the blunted edge of the counter-throwers and does not take into account the possibility of intrusion the claw curtains in the processed material, which is a promising direction for further research.

Key words: claw curtain, plate, jam, coefficient of friction.

Введение. На сегодняшний день травматизм в деревообрабатывающей промышленности, к сожалению, остается на довольно высоком уровне, ежегодно происходят десятки несчастных случаев разной степени тяжести, в том числе в среднем 2–3 несчастных случая со смертельным исходом. Особенно часто травматизм наблюдается при эксплуатации круглопильных деревообрабатывающих станков для продольной распиловки. В связи с тем, что на большинстве станков данной группы осуществляется встречное резание, то силы, возникающие в процессе резания, стремятся выбросить заготовку в противоположную сторону, т. е. навстречу оператору [1].

Основная часть. Для предотвращения выброса заготовок из станка предусмотрены противовыбрасыватели (когтевые завесы). Они выполняются в виде завесы, набора пластин (когтей), заостренных со стороны контакта с древесиной и свободно качающихся на оси крепления (рис. 1).

При подаче заготовки в станок когти свободно поворачиваются и скользят по поверхности древесины, не препятствуя ее движению. В случае попытки выброса заготовки пластины заостренной частью врезаются в древесину, и заготовка заклинивается между когтями и поверхностью стола.

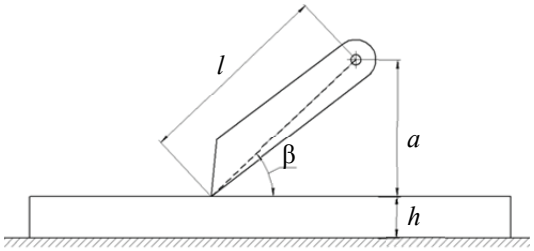


Рис. 1. Схема когтевой завесы

В многопильных станках особенно опасны обратные выбросы заостренных срезков (реек) толщиной меньше обрабатываемой заготовки, поэтому в них устанавливаются 2–3 ряда завес на разной высоте.

Угол заклинивания β, град., может быть найден по формуле

$$\beta = \arcsin\frac{a}{l}, \qquad (1)$$

где a – расстояние от центра крепления завесы до поверхности заготовки, мм; l – длина пластины завесы, мм.

Согласно ГОСТ 12.2.026.0 «Станки деревообрабатывающие. Требования безопасности к конструкции» [2] и Межотраслевым правилам по охране труда в лесной, деревообрабатывающей промышленности и в лесном хозяйстве [3] угол заклинивания должен составлять 55–65° при обработке материала любой толщины. Однако по СТБ ЕН 1870-4-2006 «Безопасность деревообрабатывающих станков. Станки круглопильные. Часть 4. Станки многополотные для продольной резки с ручной загрузкой и/или выгрузкой» [4] угол заклинивания должен составлять уже 55–85°.

Рассмотрим условие работоспособности противовыбрасывателей, принимая допущение, что кромки пластин когтевых завес затуплены и врезания в древесину не происходит (рис. 2).

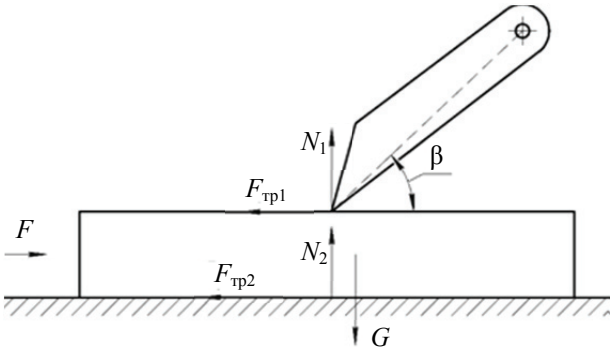


Рис. 2. Схема сил, действующих на заготовку

Исходя из рис. 2, условие работоспособности завесы имеет вид

$$F_{тр1} + F_{тр2} > F, \qquad (2)$$

где $F_{тр1}$ – сила трения между пластиной когтевой завесы и заготовкой, Н; $F_{тр2}$ – сила трения между заготовкой и столом станка, Н; F – сила, действующая на заготовку в момент вылета, Н.

Сила трения $F_{тр1}$, Н, может быть найдена по формуле

$$F_{тр1} = N_1 \cdot f_1, \qquad (3)$$

где N_1 – нормальная реакция поверхности заготовки, Н; f_1 – коэффициент трения пластины когтевой завесы по древесине.

Сила трения $F_{тр2}$, Н, определяется по зависимости

$$F_{тр2} = N_2 \cdot f_2, \qquad (4)$$

где N_2 – нормальная реакция стола станка, Н; f_2 – коэффициент трения заготовки по поверхности стола станка.

Очевидно, что нормальная реакция стола станка N_2, Н, определяется по формуле

$$N_2 = N_1 + G, \qquad (5)$$

где G – вес заготовки, Н.

Рассмотрим условие равновесия пластины (рис. 3).

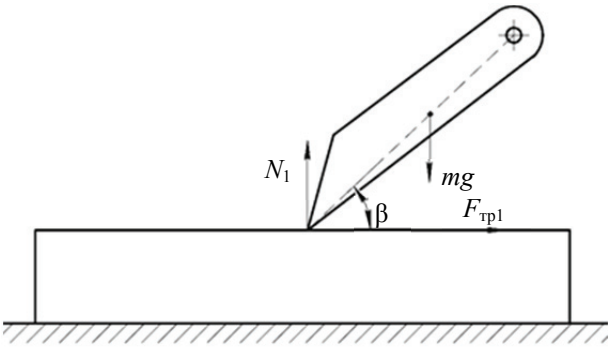


Рис. 3. Схема сил, действующих на пластину когтевой завесы

Запишем сумму моментов сил относительно оси, принимая в первом приближении, что центр масс пластины находится на середине длины l:

$$\sum M_o = 0, \quad (6)$$

$$N_1 \cdot l \cdot \cos\beta - F_{тр1} \cdot l \cdot \sin\beta - m \cdot g \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos\beta = 0, \quad (7)$$

где m – масса заготовки, кг; g – ускорение свободного падения, м/с^2.

Разделим обе части выражения на $l \cdot \cos\beta$ и с учетом (3) получим

$$N_1 - N_1 \cdot f_1 \cdot \operatorname{tg}\beta - \frac{m \cdot g}{2} = 0. \quad (8)$$

Из уравнения (8) выразим N_1:

$$N_1 = \frac{m \cdot g}{2(1 - f_1 \cdot \operatorname{tg}\beta)}. \quad (9)$$

Тогда, с учетом вышеизложенного, условие (2) может быть переписано в виде

$$\frac{m \cdot g}{2(1 - f_1 \cdot \operatorname{tg}\beta)} \cdot f_1 + \left(\frac{m \cdot g}{2(1 - f_1 \cdot \operatorname{tg}\beta)} + G \right) \cdot f_2 > F. \quad (10)$$

Перейдя к равенству через коэффициент запаса α и перегруппировав слагаемые, неравенство (10) примет вид

$$\frac{m \cdot g \cdot (f_1 + f_2)}{2(1 - f_1 \cdot \operatorname{tg}\beta)} + G \cdot f_2 = \alpha \cdot F. \quad (11)$$

Очевидно, что эффективность работ когтевых завес определяется не только углом заклинивания β, но и коэффициентами трения f_1 и f_2, а также весом самой пластины mg.

Проанализируем влияние вышеуказанных факторов, пренебрегая $G \cdot f_2$ ввиду его малости.

На рис. 4 представлено влияние угла заклинивания на сумму возникающих сил трения.

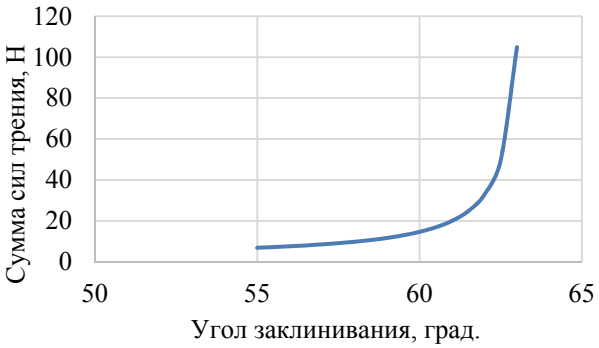


Рис. 4. График влияния угла заклинивания на сумму сил трения

График построен при f_1 = 0,5; f_2 = 0,5; m = 0,4. При дальнейшем увеличении угла функция стремится к бесконечности, т. е. происходит заклинивание заготовки.

Условием заклинивания заготовки является равенство нулю знаменателя дроби в выражении (11):

$$1 - f_1 \cdot \operatorname{tg}\beta = 0. \quad (12)$$

Увеличение веса пластины приводит к линейному росту функции и, соответственно, положительно сказывается на работоспособности защитного устройства. Вес может быть увеличен как за счет увеличения массы пластины (т. е. увеличения ее ширины, толщины или длины), так и за счет дополнительных приспособлений, например, пружин, которые будут поджимать ее к обрабатываемому материалу.

Коэффициент f_2 так же влияет прямо пропорционально на рассматриваемую функцию, но его увеличение не рационально, так как это усложнит подачу заготовок в станок.

Влияние коэффициента f_1 аналогично влиянию угла заклинивания (рис. 5).

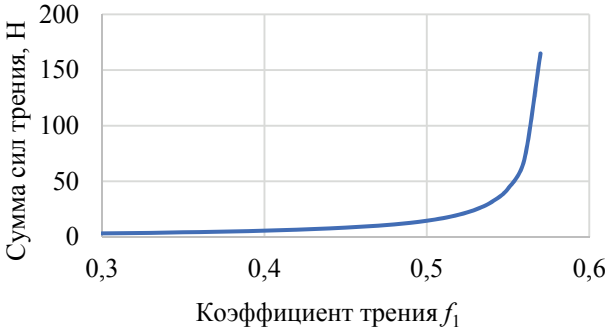


Рис. 5. График влияния коэффициента трения f_1 на сумму сил трения

Определим критические углы $\beta_{кр}$, при которых происходит заклинивание заготовки. На основании зависимости (12) построим график влияния коэффициента трения на угол заклинивания (рис. 6).

Коэффициент трения скольжения стали по древесине зависит от ряда факторов: породы древесины, ее влажности, шероховатости поверхности, направления волокон. Согласно литературе [5] коэффициент трения стали по древесине изменяется в пределах от 0,2 до 0,6.

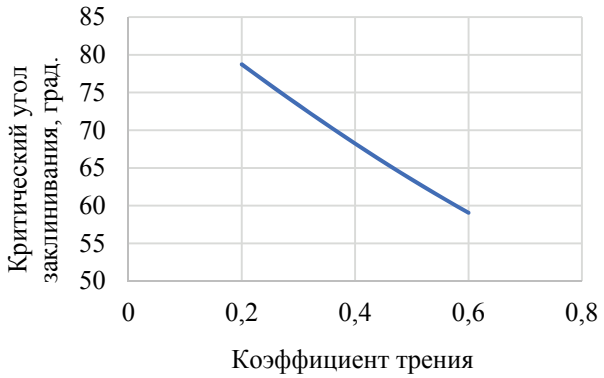


Рис. 6. Влияние коэффициента трения на критический угол

Как показывает график, с ростом коэффициента трения заклинивание будет происходить при меньших углах.

Заключение. Существующие рекомендации, приведенные в отечественных ТНПА, не совершенны, так как не учитывают всех факторов, влияющих на эффективность работы когтевых завес.

В нормативных документах на сегодняшний день нет определенности по основным конструктивным особенностям когтевых завес, в частности рекомендации по углам заклинивания различаются. Согласно полученным зависимостям при малых коэффициентах трения и отсутствию врезания пластины когтевой завесы в древесину (кромка завес затуплена) безопасность работы на станке не обеспечивается.

Одним из способов повышения эффективности работы противовыбрасывателей, технически легко реализуемых на практике, является увеличение усилия, с которым пластины когтевых завес прижимаются к обрабатываемому материалу.

Необходимы дополнительные исследования, направленные на повышение эффективности работы когтевых завес, в том числе с учетом особенностей современного технологического оборудования.

Список литературы

1. Гришкевич А. А., Гриневич С. А., Гаранин В. Н. К вопросу об обеспечении безопасности при эксплуатации круглопильного оборудования // Тезисы докладов 84-й науч.-техн. конф. БГТУ, Минск, 2020 г. / БГТУ. Минск, 2020. С. 152–153.

2. Оборудование деревообрабатывающее. Требования безопасности к конструкции: ГОСТ 12.2.026.0–1993. Введ. 01.01.1996. Минск: Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 1996. С. 46.

3. Межотраслевые правила по охране труда в лесной, деревообрабатывающей промышленности и в лесном хозяйстве: постановление М-ва труда и социальной защиты Респ. Беларусь и М-ва лесного хозяйства Респ. Беларусь, 30 дек. 2008 г., № 211/39 // Национальный правовой интернет портал Республики Беларусь. URL: http://www.pravo.by/pdf/2009-147/2009-147(016-099).pdf (дата обращения: 11.03.2020).

4. Безопасность деревообрабатывающих станков. Станки круглопильные. Часть 4. Станки многополотные для продольной резки с ручной загрузкой и/или выгрузкой: СТБ ЕН 1870-4-2006. Введ. 01.01.2007. Минск: Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2006. С. 36.

5. Лаптев А. Г. Станки и инструменты по обработке древесины: пособие к выполнению курсового проекта. Л.: ЛТА, 1966. 181 с.

References

1. Grishkevich A. A., Grinevich S. A., Garanin V. N. On the issue of ensuring safety during the operation of circular saw equipment. *Tezisy dokladov 84-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii BGTU* [Abstracts of the 84nd scientific and technical conference at BSTU]. Minsk, 2020, pp. 152–153 (In Russian).

2. GOST 12.2.026.0–1993. Woodworking equipment. Safety requirements for the design. Minsk, Gosudarstvennyy komitet po standartizatsii Respubliki Belarus' Publ,, 1996. P. 46 (In Russian).

3. *Mezhotraslevyye pravila po okhrane truda v lesnoy, derevoobrabatyvayushchey promyshlennosti i lesnom khozyaystve: postanovleniye Ministerstva truda i sotsial'noy zashchity Respubliki Belarus' i Ministerstva lesnogo khozyaystva Respubliki Belarus', 30.12.2008, no. 211/39* [Intersectoral labor protection rules in the forestry, woodworking industry and forestry: Decree of the Ministry of Labor and Social Protection of the Republic of Belarus and the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus, December 30, 2008, no. 211/39]. Available at: http://www.pravo.by/pdf/2009-147/2009-147(016-099).pdf (accessed 11.03.2020).

4. STB EN 1870-4-2006. Safety of woodworking machines. Circular saw machines. Part 4. Multi-band machines for slitting with manual loading and / or unloading. Minsk, State Committee for Standardization of the Republic of Belarus, 2006. P. 36 (In Russian).

5. Laptev A. G. *Stanki i instrumenty po obrabotke drevesiny* [Machine tools and wood processing]. Leningrad, LTA Publ., 1966. 181 p.

Информация об авторах

Гриневич Сергей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: gres410a@ya.ru

Гришкевич Александр Александрович − кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dosy@belstu.by

Волкович Дмитрий Сергеевич – студент. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dosy@belstu.by

Information about the authors

Grinevich Sergey Anatol'yevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gres410a@ya.ru

Grishkevich Alksander Aleksandrovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dosy@belstu.by

Volkovich Dmitry Sergeevich – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dosy@belstu.by

Поступила 12.03.2020

УДК 621.74:669.13

[1]**А. С. Раковец,** [1]**Д. В. Куис,** [1]**Н. А. Свидунович,** [2]**С. Н. Лежнев**
[1]Белорусский государственный технологический университет
[2]Рудненский индустриальный институт (Республика Казахстан)

ВЛИЯНИЕ НАНОУГЛЕРОДНЫХ ДОБАВОК В СОСТАВЕ КОМПЛЕКСНЫХ МОДИФИКАТОРОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

Решение вопросов повышения прочностных и эксплуатационных свойств отливок, снижения их металлоемкости на современном этапе возможно оптимизацией существующих технологий и составов материалов, а также применением новейших технологий и материалов, в частности нанотехнологий и наноматериалов, с учетом новых достижений в области исследований по строению многокомпонентных расплавов чугуна, использованием явлений наследственности и внедрением различных методов воздействия на расплавы.

В статье исследовано влияние комплексного модификатора, содержащего наноуглеродные компоненты, на структурообразование высокопрочного чугуна. Проведена оценка микроструктуры и показателей механических свойств.

Установлено, что разрабатываемые модификаторы за счет непосредственного ввода в расплав центров кристаллизации в виде дисперсных углеродных частиц позволяют значительно повысить эффект модифицирования и снизить затраты на модификаторы благодаря их меньшему расходу.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, комплексные модификаторы, лигатура, наноуглеродные компоненты, фуллереновая сажа, структурообразование, прочность, твердость, эффективность модифицирования.

[1]**A. S. Rakovets,** [1]**D. V. Kuis,** [1]**N. A. Svidunovich,** [2]**S. N. Lezhnev**
[1]Belarusian State Technological University
[2]Rudny Industrial Institute (Republic of Kazakhstan)

INFLUENCE OF NANOCARBON COMPONENTS IN THE COMPOSITION OF COMPLEX MODIFIERS ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF HIGH-STRENGHT CAST IRON

The solution to the issues of increasing the strength and working properties of castings, the reduction in their metal consumption at the current stage is possible by optimization of the existing technologies and the compositions of materials, as well as the application of the latest technologies and materials, in particular nanotechnologies and nanomaterials, taking into account new achievements in the field of research on the structure of multicomponent melts of cast iron, the use of heredity phenomena and the introduction of various methods of influence on melts.

The paper examined the effects of a complex modifier containing nanocarbon components on the structure formation of high-strength cast iron. The microstructure and mechanical properties were evaluated.

It has been found that the modifiers under development, by directly introducing the crystallization centres into the melt in the form of dispersed carbon particles, can significantly increase the effect of modification and reduce the costs of modifiers due to their lower consumption.

Key words: high-strength cast iron, complex modifiers, ligature, nanocarbon components, fullerene soot, structure formation, strength, hardness, efficiency of modification.

Введение. Основные направления развития технологий высокопрочного чугуна заключаются в оптимизации металлургических и литейных процессов, повышении комплекса механических и специальных свойств изделий при уменьшении их массы, энерго- и ресурсосбережения в сфере производства и эксплуатации [1].

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом в странах с развитым машиностроением применяется в качестве заменителя стали, ковкого чугуна и цветных сплавов при производстве тонкостенных деталей, поскольку его получение на 30–35% дешевле, чем стали, в 3–4 раза дешевле, чем цветных сплавов, и лишь на 20–30% дороже, чем обычного серого чугуна.

Физико-механические и эксплуатационные свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом определяются структурой металлической матрицы, основными факторами регулирования которой являются: качество исходного расплава, параметры модифицирования

(включающие состав, количество, способ и очередность ввода присадок), химический состав, легирование, скорость охлаждения отливок и термическая обработка [2–5]. Универсальный, относительно дешевый, технологически гибкий и высокоэффективный метод управления структурой кристаллизующегося сплава – это модифицирование [6].

Наряду с разработкой новых составов современных модификаторов, в последние годы отмечаются тенденции развития новых способов модифицирования с применением наноструктурных материалов.

Механизм действия наносодержащего модификатора заключается в том, что при попадании частицы науглероживателя в расплав чугуна, наноструктурированные элементы под действием термических напряжений отделяются от носителя (матрицы) и формируют зародыш кристаллизации графитного включения [7–8].

Создание новых составов модификаторов, в том числе с использованием углеродных компонентов различной степени дисперсности и структурированности, и рациональных технологий их применения, обеспечивающих получение требуемых структуры и свойств, требует дальнейшего исследования влияния раздельных и комплексных добавок на структуру и свойства чугуна, изучения технологических условий модифицирования чугуна различными присадками на эффективность их действия [9].

Целью данной работы является исследование структурообразования и оценка показателей механических свойств высокопрочных чугунов, полученных при модифицировании расплава комплексным модификатором, содержащим наноуглеродные компоненты.

Основная часть. При разработке комплексных модификаторов высокопрочного чугуна в рамках данной работы в качестве базового был выбран сфероидизирующий модификатор для чугуна с магнием ЭМ (пс) и графитизирующий бариевый модификатор «Графитплюс» для инокулирующего модифицирования высокопрочного чугуна. Рекомендуемый расход сфероидизирующего модификатора составляет 0,8–1,8% в зависимости от степени очистки расплава и метода ввода в расплав, графитизирующего – 0,05–0,3%.

В качестве наноуглеродных компонентов использовали фуллереносодержащую сажу. С целью обеспечения усвоения высокодисперсных углеродных частиц расплавом в качестве добавок в составе комплексного модификатора применяли прессованные алюминийкремниевые лигатуры, содержащие наноуглеродные компоненты. При этом, известна высокая эффективность алюминия в составах модификаторов длительного действия, что определяет целесообразность его использования [10].

Образцы лигатур готовили путем предварительной механоактивации в шаровых мельницах измельченной стружки силумина АЛ9 и фуллереносодержащей сажи, с последующим экструдированием лигатур Al-Si-C с расчетом содержания в них 10 масс. % углерода [11]. Используемые углеродные материалы были получены на оборудовании ООО «ФизТехПрибор» на базе Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург.

В составе смесевого модификатора использовали лигатуру Al-Si-C в количестве 30% по отношению к базовому графитизирующему модификатору.

Исследование влияния разрабатываемых модификаторов на структурообразование проводили с использованием чугуна индукционной плавки, выплавленного с использованием чугунного лома марки ВЧ30 с получением стабильного базового химического состава, %: C – 2,7–3,8; Si – 0,5–2,9; Mn – 0,2–0,6; P – до 0,1, S – до 0,02. Модификатор вводили в струю металла при переливке в разливочный тигель, который предварительно был подогрет в муфельной печи до температуры 750°C. Заливка расплава высокопрочного чугуна производилась при температуре 1400–1420°C. Температура контролировалась многоканальным регистратором РМТ 39D, подключенным к ПК. Производили отбор проб для исследования структуры и показателей свойств.

Микроструктуру образцов исследовали на микрошлифах до и после травления с применением металлографического комплекса на базе микроскопа МИ-1. Фазовый состав определяли на рентгеновском дифрактометре D8 Advance фирмы «Bruker», с использованием программ «X-RAY» автоматизации рентгенофазового анализа. Спектры комбинационного рассеяния света при фиксированном значении разрешения (2 $см^{-1}$) регистрировали с помощью спектрально-аналитического комплекса на основе сканирующего конфокального микроскопа «Nanofinder HighEnd» (LOTIS-TII, Беларусь – Япония).

Таким образом, для дальнейших исследований были получены образцы модифицированных чугунов, приведенные в табл. 1.

Результаты исследований фазового (рис. 1) и элементного составов показывают, что исследованная фуллереновая сажа в основе своей состоит из аморфного углерода, о чем свидетельствует ярко выраженное «гало» в интервале углов 2θ = = 13–25°, характерное для неупорядоченного аморфного состояния, содержит ≈8% фуллеренов и не содержит, кроме небольшого количества кислорода, никаких посторонних примесей.

Таблица 1

Образцы модифицированных чугунов, полученных при выплавке

Обозначение образца	Характеристика
А	Чугун модифицированный 1,5% сфероидизирующего модификатора ЭМ (пс) и 0,2% графитизатора «Графитплюс»
Б	Чугун модифицированный 0,8% сфероидизирующего модификатора ЭМ (пс) и 0,2% графитизатора «Графитплюс»
В	Чугун модифицированный 0,8% сфероидизирующего модификатора ЭМ (пс) и 0,2% графитизатора «Графитплюс» и 0,3% лигатуры (Al-Si + + фуллереновая сажа)

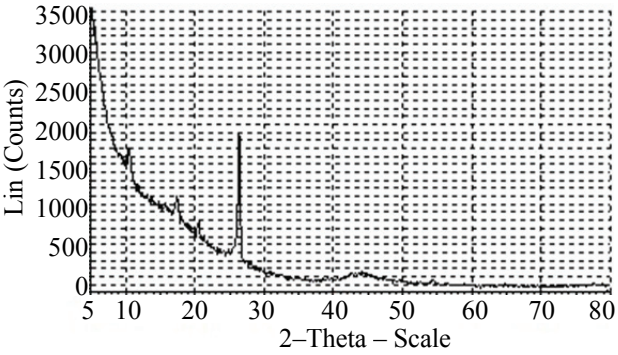


Рис. 1. Дифрактограмма фуллереновой сажи

Рентгеноструктурным анализом определено структурное превращение углерода с образованием в лигатурах аморфной углеродной фазы наряду с карбидообразованием.

Спектроскопией комбинационного рассеяния света в спектрах углерода установлено наличие линии различной интенсивности слева от основного пика (рис. 2), свидетельствующее об аморфизации и образовании стеклоуглерода, что подтверждает результаты рентгеноструктурного анализа.

Такое структурное состояние полученных лигатур определяет возможность их использования в качестве высокоактивных добавок в составах модификаторов литейных железоуглеродистых сплавов.

Одним из общепринятых критериев оценки эффективности графитизирующего модифицирования высокопрочного чугуна является плотность распределения включений шаровидного графита в структуре. Немаловажным считается уменьшение степени переохлаждения в процессе кристаллизации эвтектики.

Модифицирование стандартным модификатором и лигатурой, содержащей наноуглеродные компоненты, по сравнению с остальными модификаторами, обеспечивает наиболее высокий уровень графитизации структуры отливок из высокопрочного чугуна (рис. 3).

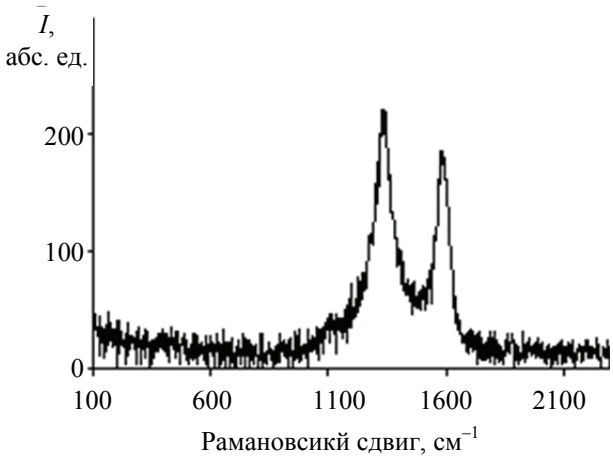


Рис. 2. Спектр комбинационного рассеяния света образца лигатуры Al-Si-C

Рис. 3. Микроструктура высокопрочного чугуна, выплавленного с использованием лигатуры (Al + фуллереновая сажа)

При модифицировании лигатурой Al + фуллереновая сажа (образец В) сформировалась перлито-ферритная металлическая основа с 90% феррита, согласно ГОСТ-3443-87 графитные включения правильной формы и равномерно распределены по всей плоскости шлифа, диаметр включений 15 мкм, количество включений графита – ШГ10.

При исследовании структурного состояния высокопрочного чугуна, полученного модифицированием стандартным модификатором (об-

разец А), наблюдается равномерное распределение графитных включений, при этом отмечается снижение количества центров кристаллизации, согласно ГОСТ-3443-87 количество включений графита – ШГ6, размер включений увеличился до 25 мкм, металлическая основа: 20% перлита и 80% феррита (рис. 4).

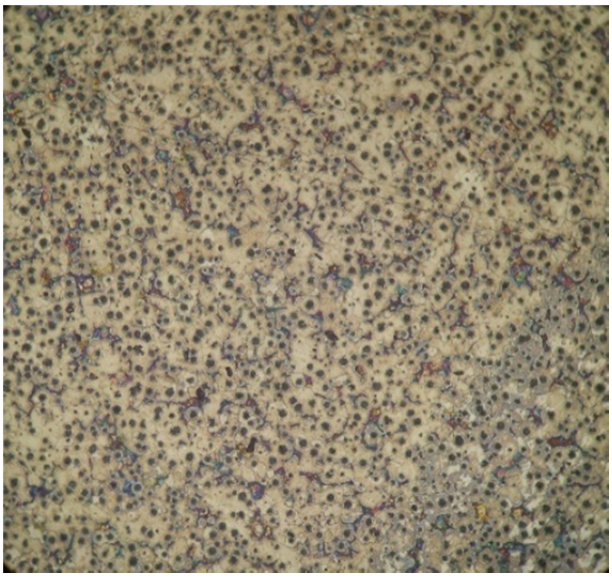


Рис. 4. Микроструктура высокопрочного чугуна, модифицированного 1,5% сфероидизирующего модификатора ЭМ (пс) и 0,2% графитизатора «Графитплюс»

Анализ микроструктуры высокопрочного чугуна (образец Б), модифицированного 0,8% сфероидизирующего модификатора ЭМ (пс) и 0,2% графитизатора «Графитплюс», показал, что графитные включения неоднородны, их размер составляет от 15 до 45 мкм. Количество включений графита значительно меньше, чем в предыдущих образцах, и находится в пределах – ШГ12. Металлическая основа образца перлито-ферритная, состоит из 94% феррита (рис. 5).

Результаты исследования показателей механический свойств полученных образцов приведены в табл. 2.

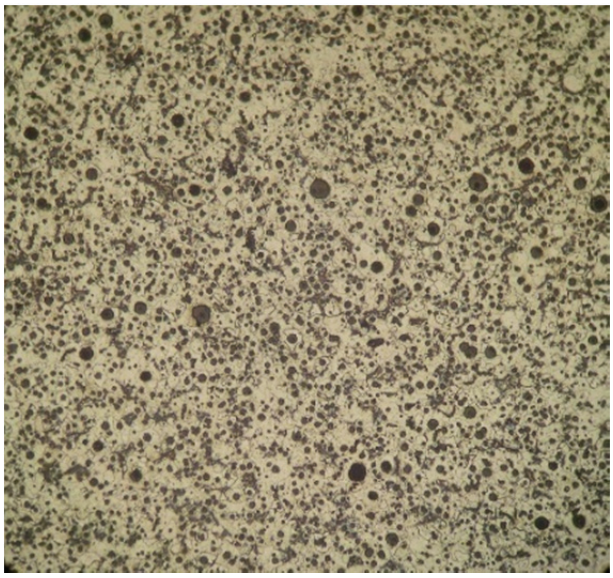


Рис. 5. Микроструктура высокопрочного чугуна, модифицированного 0,8% сфероидизирующего модификатора ЭМ (пс) и 0,2% графитизатора «Графитплюс»

Таблица 2

Показатели механических свойств образцов чугуна, полученных при выплавке

Обозначение образца	Твердость по Бринелю, МПа	$\sigma_в$, МПа
А	2200	600
Б	1900	420
В	2000	620

Заключение. Применение для ковшевой обработки комплексного модификатора, содержащего 90% алюминия и 10% фуллереновой сажи, позволяет примерно в 2 раза уменьшить количество используемого сфероидизирующего модификатора, способствует более длительному сохранению эффекта модифицирования и увеличению прочностных характеристик на 40% по сравнению со стандартными сфероидизирующими модификаторами, принятыми для сравнения.

Список литературы

1. Бубликов В. Б. Высокопрочному чугуну – 60 // Литейн. пр-во. 2008. № 11. С. 2–8.

2. Корниенко Э. Н., Панов А. Г., Хальфин Д. Ф. Перспективы производства отливок из ЧШГ аустенитно-бейнитного класса // Литейщик России. 2006. № 2. С. 22–25.

3. Cast ferrous alloy [Electronic resource]: pat. US2485760. K. D. MILLIS AT AL, Publ. date 25.11.1949. URL: https://patents.google.com/patent/US2485760A/en?oq=US2485760.+K.D.+MILLIS+AT+AL (date of access: 03.02.2020).

4. Высококачественные чугуны для отливок / В. С. Шумихин [и др.]; под ред. Н. Н. Александрова. М.: Машиностроение. 1982. 222 с.

5. Любченко А. П. Высокопрочные чугуны. М.: Металлургия, 1982. 120 с.

6. Давыдов С. В., Панов А. Г., Корниенко А. Э. Рынок модификаторов – хаос или развитие? // Металлургия машиностроения. 2006. № 3. С. 8–9.

7. Кондратьев В. В., Мехнин А. О., Иванов Н. А. Исследования и разработка рецептуры наномодифицированного чугуна для ниппелей анодов алюминиевых электролизеров // Металлург. 2012. № 1. С. 69–71.

8. Исследование влияния модификаторов с наноразмерами на кристаллизационный процесс в сплавах на основе железа / Гаврилова Р. [и др.] // Научные известия. 2013. № 2 (139). С. 313–315.

9. Мищенко С. В. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.

10. Писаренко Л. З., Свидунович Н. А., Куис Д. В. Модификатор длительного действия // Литье и металлургия. 2006. № 2. С. 84–90.

11. Волочко А. Т., Шегидевич А. А., Куис Д. В. Формирование структуры и свойств композитов, полученных при обработке алюминиевого расплава лигатурами, содержащими стеклоподобные углеродные частицы // Композиты и наноструктуры. 2014. Т. 6, № 2. С. 2–13.

References

1. Bublikov V. B. High-strength cast iron. *Liteynoye proizvodstvo* [Foundry], 2008, no. 11, pp. 2–8 (In Russian).

2. Kornienko E. N., Panov A. G., Halfin D. F. Prospects for the production of austenitic-bainitic castings from ChSG. *Liteyshchik Rossii* [Foundryman of Russia], 2006, no. 2, pp. 22–25 (In Russian).

3. Cast ferrous alloy: pat. US2485760. K. D. MILLIS AT AL, Publ. date 25.11.1949. Available at: https://patents.google.com/patent/US2485760A/en?oq=US2485760.+K.D.+MILLIS+AT+AL (accessed 03.02.2020).

4. Shumikhin V. S., Kutuzov V. P., Khramchenkov A. I. *Vysokokachestvennye chuguny dlya otlivok* [High-quality cast iron for castings]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1982. 222 p.

5. Lyubchenko A. P. *Vysokoprochnyye chuguny* [High-strength cast irons]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. 120 p.

6. Davydov S. V., Panov A. G., Kornienko A. E. Modifiers market – chaos or development*? Metallurgiya mashinostroyeniya* [Metallurgy of Mechanical Engineering], 2006, no. 3, pp. 8–9 (In Russian).

7. Kondratiev V. V., Mehnin A. O., Ivanov N. A. Research and development of nanomodified cast iron compounding for nipples of anodes of aluminum electrolyzers. *Metallurg* [Metallurg], 2012, no. 1, pp. 69–71 (In Russian).

8. Gavrilova R., Manchev M., Manolov V., Cherepanov A. Investigation of the effect of modifiers with nanosizes on the crystallization process in iron-based alloys. *Nauchnyye izvestiya* [Scientific News], 2013, no. 2 (139), pp. 313–315 (In Russian).

9. Mishchenko S. V. *Uglerodnyye nanomaterialy. Proizvodstvo, svoystva, primeneniye* [Carbon nanomaterials. Production, properties, application.]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2008. 320 p.

10. Pisarenko, L. Z., Svidunovich N. A., Kuis D. V. Long-acting modifier. *Lit'ye i metallurgiya* [Casting and Metallurgy], 2006, no. 2, pp. 84–90 (In Russian).

11. Volochko A. T., Shegidevich A. A., Queise D. V. Formation of the structure and properties of composites obtained during the processing of an aluminum melt by ligatures containing glass-like carbon particles. *Kompozity i nanostruktury* [Composites and nanostructures], 2014, vol. 6, no. 2, pp. 2–13 (In Russian).

Информация об авторах

Раковец Антон Сергеевич – аспирант кафедры материаловедения и проектирования технических систем. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: antonrakovez@mail.ru

Куис Дмитрий Валерьевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой материаловедения и проектирования технических систем. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: KuisDV@belstu.by

Свидунович Николай Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и проектирования технических систем. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Svidunovich@belstu.by

Лежнев Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии и горного дела. Рудненский индустриальный институт (220141, г. Рудный, ул. 50 лет Октября, 38, Костанайская область, Республика Казахстан). E-mail: sergey_legnev@mail.ru

Information about the authors

Rakovets Anton Sergeevich – PhD student, the Department of Materials Science and Design of Technical Systems. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: antonrakovez@mail.ru

Kuis Dmitriy Valer'yevich – PhD (Engineering), Head of the Department of Materials Science and Design of Technical Systems. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: KuisDV@belstu.by

Svidunovich Nikolay Alexandrovich – DSc (Engineering), Professor, the Department of Materials Science and Design of Technical Systems. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Svidunovich@belstu.by

Lezhnev Sergey Nikolaevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Metallurgy and Mining. Rudny Industrial Institute (38, 50 let Oktyabrya str., 220141, Rudny, Kostanay region, Republic of Kazakhstan). E-mail: sergey_legnev@mail.ru

Поступила 12.03.2020

УДК 674.05:631.06

А. А. Гришкевич, А. Ю. Юдицкий
Белорусский государственный технологический университет

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ КРИТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ШЛИФОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

Одним из путей повышения эффективности эксплуатации деревообрабатывающего оборудования является определение критерия потери режущей способности инструмента и назначение мероприятий, позволяющих увеличить период его стойкости. Период стойкости, в частности, зависит от качества подготовки дереворежущего инструмента к работе, в том числе и шлифовального.

При работе на деревообрабатывающем оборудовании при шлифовании древесины и древесных материалов приходится сталкиваться с проблемой потери режущей способности инструмента в результате заполнения пространства между зернами продуктами резания и неполным их удалением в процессе очистки, что в значительной мере влияет на производительность процесса, увеличение энергопотребления и ухудшение качества обработанной поверхности.

В настоящей работе представлены результаты исследований по определению работы по отрыву продуктов резания из межзернового пространства шлифовальной ленты. Установлены рациональные (критические) режимы резания (для выбранных скоростей подачи V_s и припусков на обработку h), определяющие максимально возможную производительность оборудования при заданных технологических режимах.

Ключевые слова: шлифование, шлифовальная лента, стойкость, производительность, работа, режим резания, очистка.

A. A. Grishkevich, A. Yu. Yuditsky
Belarusian State Technological University

CRITICAL RESEARCH RESULTS WOOD GRINDING MODES

One of the ways to increase the efficiency of operation of woodworking equipment is to determine the criterion for the loss of the cutting ability of the tool and the appointment of measures to increase its durability. The period of resistance, in particular, depends on the quality of preparation of the wood-cutting tool for work, including grinding.

When working on woodworking equipment when grinding wood and wood-based materials, one has to face the problem of loss of cutting ability of the tool as a result of filling the space between grains of cutting products and their incomplete removal during cleaning, which significantly affects the performance of the process, increase in energy consumption and deterioration of the surface quality.

This paper presents the results of studies to determine the work on separation of cutting products from the intergrain space of the grinding belt. Rational (critical) cutting conditions were established (for the selected feed rates V_s and machining allowances h), which determine the maximum possible productivity of the equipment at given technological conditions.

Key words: grinding, sanding belt, durability, productivity, work, cutting mode, cleaning.

Введение. Шлифование является широко используемым технологическим процессом в деревообработке, наибольшее распространение он получил в мебельном производстве, так как именно там требуется получать высокие классы шероховатости поверхности. Он же является одним из самых энергетически затратных режимов обработки.

Затруднительным при оптимизации процесса шлифования является и то обстоятельство, что этот процесс лезвийной механической обработки является особенным и специфическим, к его описанию не могут быть непосредственно применены закономерности обычного лезвийного резания [1].

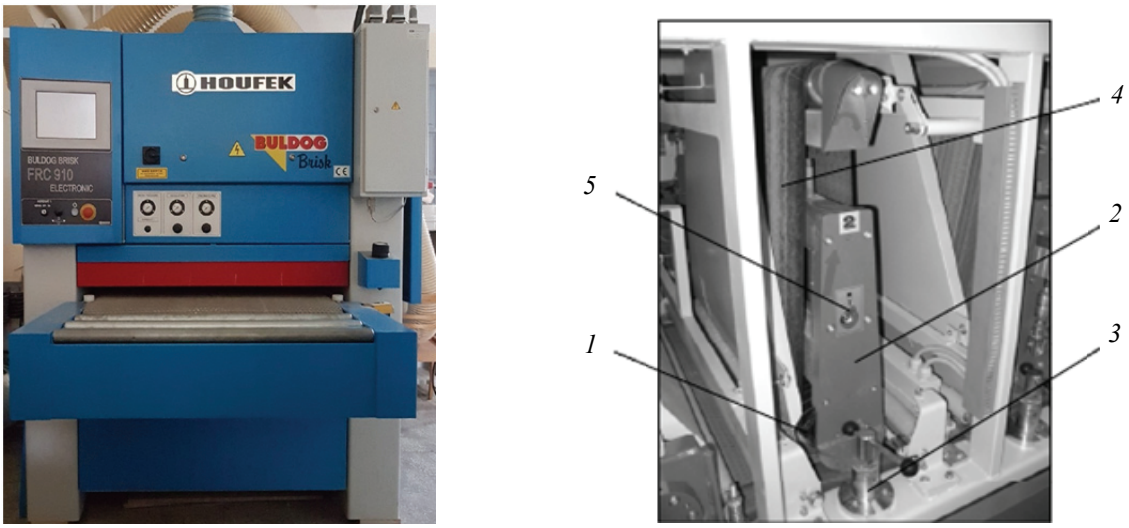
Ранее было установлено, что при работе на оборудовании для шлифования потеря режущей способности шлифовального инструмента происходит не в результате округления режущих кромок, а в результате заполнения пространства между зернами продуктами резания [2]. Это состояние пространства в значительной мере влияет на производительность процесса, увеличение энергопотребления, ухудшение каче-

ства обработанной поверхности. В результате этого существует необходимость в определении таких режимов шлифования, при которых не будет происходить критического заполнения межзернового пространства продуктами резания. Это увеличит режущие характеристики шлифовальной шкурки, и, следовательно, повысит срок ее эксплуатации до следующей замены инструмента. Так как при шлифовании деталей остатки продуктов резания из-за своей мелкой фракции не полностью удаляются, вследствие чего шлифовальная лента теряет свои режущие способности, что значительно сказывается на качестве обработки и ограничивает производительность оборудования.

Дальнейшее изучение таких оценочных показателей, как силы резания, мощность, качество обработанной поверхности, на которые существенно влияют такие технологические характеристики процесса, как скорость подачи, скорость резания, состояние инструмента, будет основано на проведении экспериментальных исследований.

Основная часть. На эффективность работы шлифовальной шкурки существенное влияние оказывает состояние межзернового пространства, которое в процессе работы инструмента заполняется продуктами резания (стружка-волокно, разрушенные зерна инструмента и другое). Они не полностью удаляются существующими средствами очистки. С целью обеспечения требуемой степени очистки шлифовальной шкурки от продуктов резания, при создании для этого новых механизмов, требуется знать или усилие, или работу, или энергию отрыва продуктов резания из пространства между зернами. Количество активных, то есть взаимодействующих с обрабатываемой поверхностью зерен зависит от зернистости инструмента, степени округления абразивных зерен, площади контакта с обрабатываемым материалом [3]. Известны ранее проводимые экспериментальные исследования по изучению влияния касательной составляющей силы резания при шлифовании древесины и древесных материалов на мощность резания, путем статического нагружения на материал шлифовальной шкуркой, описанные в работе [4]. Учитывая ранее полученные данные в работе [4], авторами были проведены экспериментальные исследования по изучению влияния режимов шлифования древесины сосны в реальном, динамическом режиме на мощность резания и производительность инструмента. Определены возможные пути увеличения периода стойкости шлифовальной шкурки.

Для проведения эксперимента использовалась широколенточная фрезерно-шлифовальная машина с числовым программным управлением Buldog FRC 910 (рис. 1). В эксперименте использовался калибровально-шлифовальный узел машины Buldog FRC 910 (рис. 1, *б*), куда была установлена новая шлифовальная шкурка зернистостью 150. Шлифовально-калибровальный узел оснащен механизмом осцилляции. Осцилляция шлифовальной ленты *4* управляется оптоэлектронным способом, контролирующий датчик работает с тремя инфракрасными лучами: средний осуществляет управление осцилляцией, крайние (правый и левый) выполняют функцию концевых выключателей. Частота осцилляции колеблется от 30 до 60 импульсов в минуту.



а *б*

Рис. 1. Экспериментальная установка:
а – фрезерно-шлифовальная машина Buldog FRC 910;
б – калибровально-шлифовальный узел

Результаты эксперимента

L, пог. м	V_s, м/мин							
	4	6	8	10	4	6	8	10
	h = 0,3 мм				h = 0,4 мм			
	B = 200 мм							
1	1,71	2,63	3,81	4,75	2,54	3,36	4,84	6,2
2	1,79	2,71	3,88	4,88	2,65	3,38	4,89	6,23
3	1,92	2,74	3,93	4,94	2,71	3,35	4,95	6,31
4	2,01	2,81	4,05	5,11	2,77	3,4	4,99	6,54
5	2,13	2,88	4,19	5,16	2,81	3,52	5,04	6,66
6	2,26	2,95	4,27	5,26	2,95	3,59	5,19	6,65
7	2,38	2,97	4,34	5,31	3,04	3,78	5,33	6,8
8	2,47	2,98	4,49	5,45	3,2	3,86	5,43	6,87
9	2,59	3,09	4,54	5,51	3,29	3,89	5,57	6,93
10	2,77	3,2	4,62	5,66	3,35	3,9	5,59	7,07
11	2,71	3,25	4,66	5,72	3,49	3,97	5,69	7,11
12	2,88	3,33	4,71	5,88	3,51	4,02	5,73	7,27
13	3,02	3,45	4,79	6,03	3,58	4,18	5,76	7,41
14	3,04	3,53	4,82	6,17	3,75	4,3	5,9	7,59
15	3,1	3,58	4,91	6,33	3,84	4,45	5,98	7,66
16	3,18	3,5	4,99	6,44	3,92	4,51	6,1	7,81
17	3,09	3,61	4,9	6,58	4,08	4,53	6,37	7,95
18	3,2	3,68	5,02	6,71	4,16	4,65	6,43	8,1*
19	3,23	3,8	5,08	6,72	4,18	4,78	6,57	8,25*
20	3,33	3,91	5,11	6,91	4,25	4,87	6,71	8,34*
21	3,36	3,95	5,15	6,98	4,38	4,93	6,79	8,44*
22	3,54	4,08	5,28	7,1*	4,41	5,08	6,86	8,58*
23	3,67	4,2	5,23	7,19*	4,45	5,11	6,94	8,63*
24	3,74	4,33	5,31	7,34*	4,68	5,13	7,09	8,79*
25	3,6	4,36	5,47	7,41*	4,75	5,28	7,14	8,81*
26	3,8	4,49	5,51	7,47*	4,84	5,43	7,26	8,83*
27	3,85	4,48	5,68	7,56*	4,9	5,54	7,39	8,79*
28	3,98	4,51	5,75	7,69*	5,09	5,7	7,53	8,88*
29	4,09	4,58	5,89	7,77*	5,16	5,83	7,6*	8,91*
30	4,12	4,6	6,11	7,8*	5,28	5,9	7,81*	8,98*

Примечание. * – образование прижогов.

Поверхность вала *1* обрезинена. Регулирование вала по высоте (положения 1 и 2 на корпусе узла (поз. *2*)) на необходимую величину припуска, равного 0,3 и 0,4 мм, удаляемого за один технологический цикл, осуществляется при помощи установленного эксцентрика, который управляется с сенсорной панели. Опора узла *2*, (поз. *3*), обеспечивает его жесткость и фиксацию. Замена шлифовальной ленты *4* производится с помощью рычага *5*, который регулирует положение верхнего направляющего вала.

Процесс задания режимов шлифования и снятия результатов описаны в методическом пособии [5].

Движение образцов материала происходит с одинаковой скоростью подачи и с установленным припуском. Шлифуемый материал подается на один и тот же участок ленты до появления прижогов. Одновременно происходит запись потребляемой мощности. После появления прижогов процесс прекращается. На последующем этапе эксперимента скорость подачи увеличивается, и исследование начинается заново, но уже на новом участке шлифовальной ленты. Изменения технологических режимов повторяются до тех пор, пока прижоги на шлифуемой поверхности не появятся в начале обработки. Далее происходит уменьшение припуска и исследования проводятся по выше описанной последовательности.

В таблице представлены результаты проведенных экспериментов по определению критических режимов шлифования. Критерием критического режима будет являться образование прижогов на поверхности древесины.

На рис. 2 и 3 показаны графики зависимости полезной мощности $P_{пол}$, кВт, от длины обрабатываемого материала L, пог. м, при различных режимах шлифования.

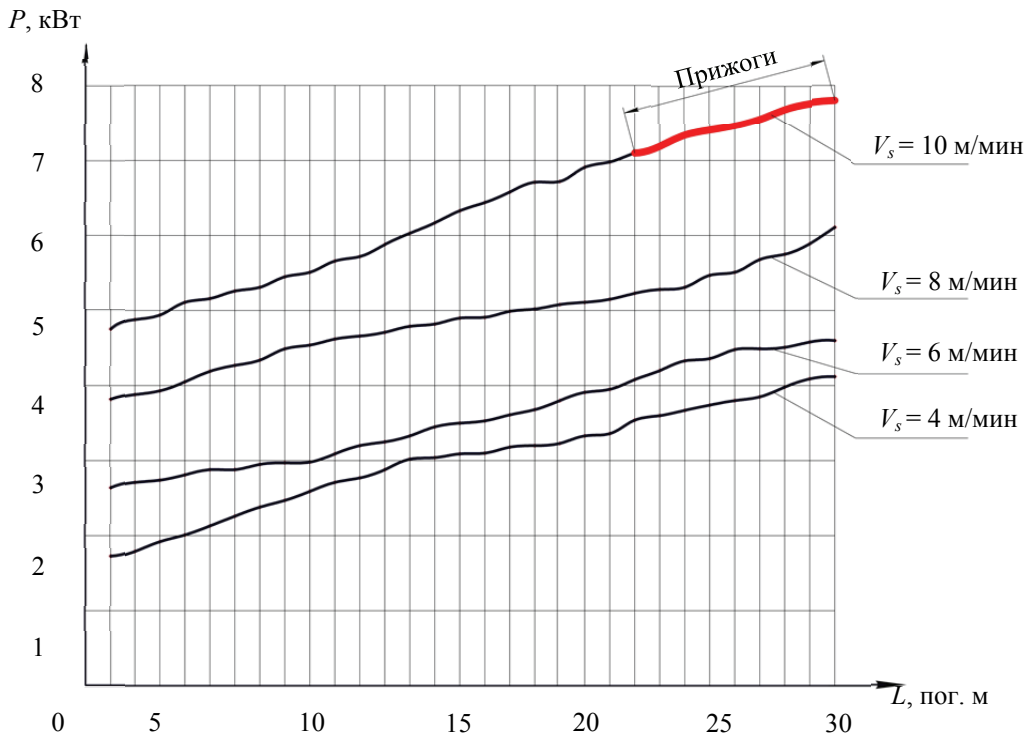


Рис. 2. График зависимости полезной мощности шлифования от длины обрабатываемого материала при припуске 0,3 мм

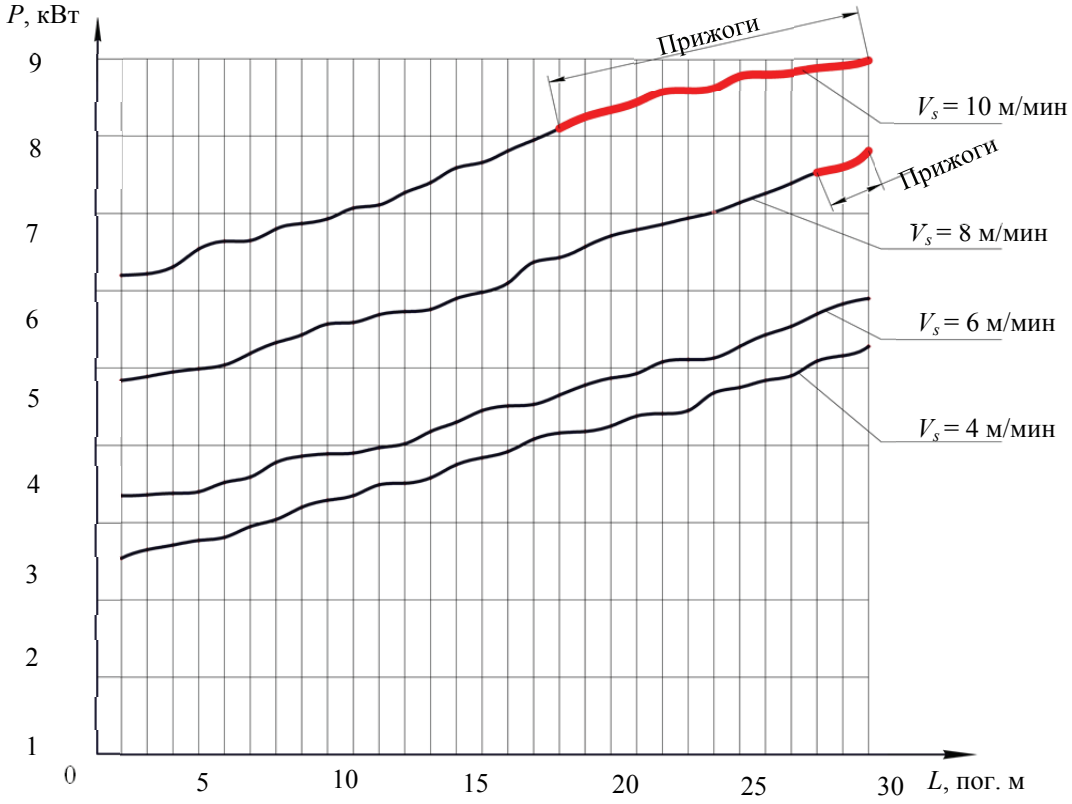


Рис. 3. График зависимости полезной мощности шлифования от длины обрабатываемого материала при припуске 0,4 мм

Как видно из графиков, при изменении скорости подачи с 4 м/мин до 6 м/мин не происходит существенного увеличения полезной мощности, а при изменении скорости подачи с 6 м/мин до 8 м/мин и более происходит значительное увеличение полезной мощности. Это свидетельствует о том, что пространство между зернами заполнено до критической величины

продуктами резания и в результате трения их о поверхность материала заготовки увеличивается потребляемая мощность и в критических случаях образуются прижоги. Прижоги при припуске h = 0,3 мм начинаются на 22 пог. м при скорости подачи 10 м/мин, а при припуске h = 0,4 мм прижоги появились уже на 28 пог. м при скорости подачи 8 м/мин и на 18 пог. м при скорости подачи 10 м/мин.

На рис. 4 показаны виды дефекта шлифования в виде прижогов.

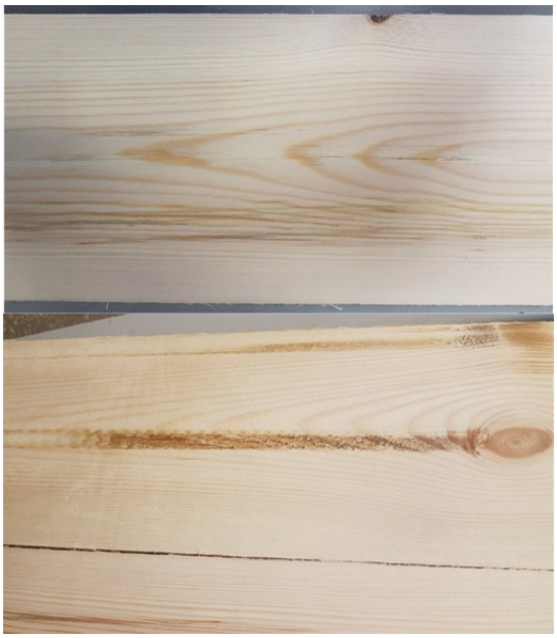


Рис. 4. Дефекты на поверхности шлифования в виде прижогов

Это свидетельствует о том, что режимы резания являются критическими.

Методика определения работы по отрыву продуктов резания из шлифовальной ленты в настоящей работе была следующая.

В разрывную машину MTS Insight (рис. 5) устанавливается специально разработанное и установленное в машину приспособление *6* для крепления образца *7*. Само приспособление представлено на рис. 6. Образец *7* (рис. 5) состоит из шлифовальной шкурки *4* (рис. 2) с заполненным пространством между зернами продуктами резания, к ней с двух сторон при помощи клея *3* закрепляются две основы *2* размером 40×40 мм, изготовленные из фанеры.

Далее данный образец при помощи восьми винтов механически крепится в стойке *1* и устанавливается в разрывную машину. На стойки *1* прикладывается сила F, которая постепенно увеличивается. При помощи датчиков записывается прикладываемое усилие F и путь перемещения стойки в виде графиков.

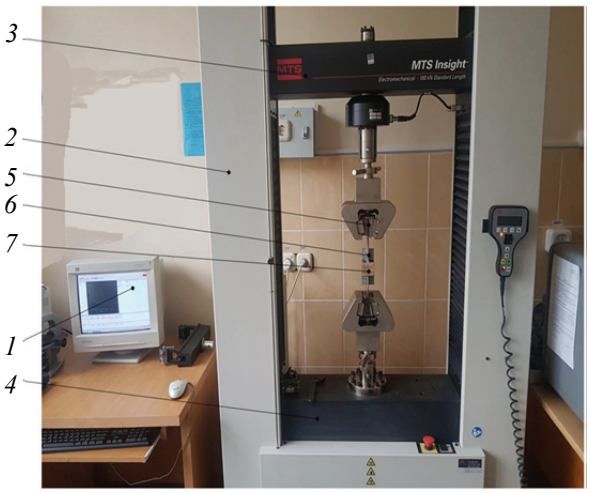


Рис. 5. Разрывная машина MTS InsightTM:
1 – персональный компьютер; *2* – рама;
3 – подвижная балка; *4* – неподвижная балка;
5 – зажимы; *6* – крепление образца;
7 – исследуемый образец

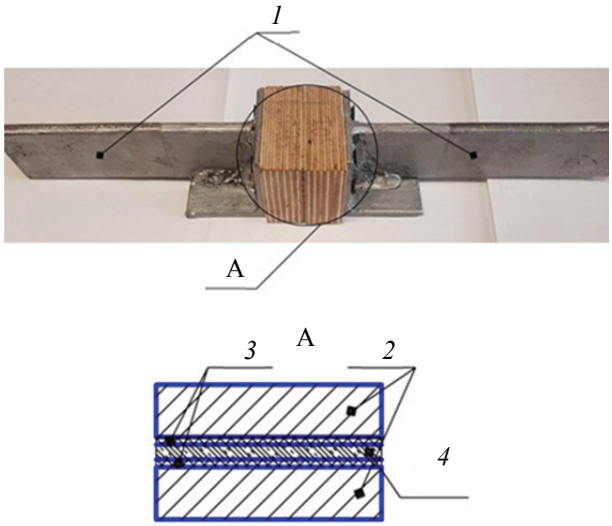


Рис. 6. Приспособление для крепления образца:
1 – стойки; *2* – основа (фанера);
3 – слой клея ПВА;
4 – шлифовальная шкурка

Для определения работы необходимо просуммировать площадь под полученной графической зависимостью (рис. 7). Так как работа – это физическая величина, численно равная произведению модуля силы, действующей на тело, на модуль перемещения, которое совершает тело под действием этой силы, и на косинус угла между направлением силы и направлением движения тела.

Для экспериментов были выбраны два образца шлифовальных шкурок зернистостью Р150 и Р80 соответственно.

Построены зависимости $F = f(L)$ (рис. 7, *а*, *б*).

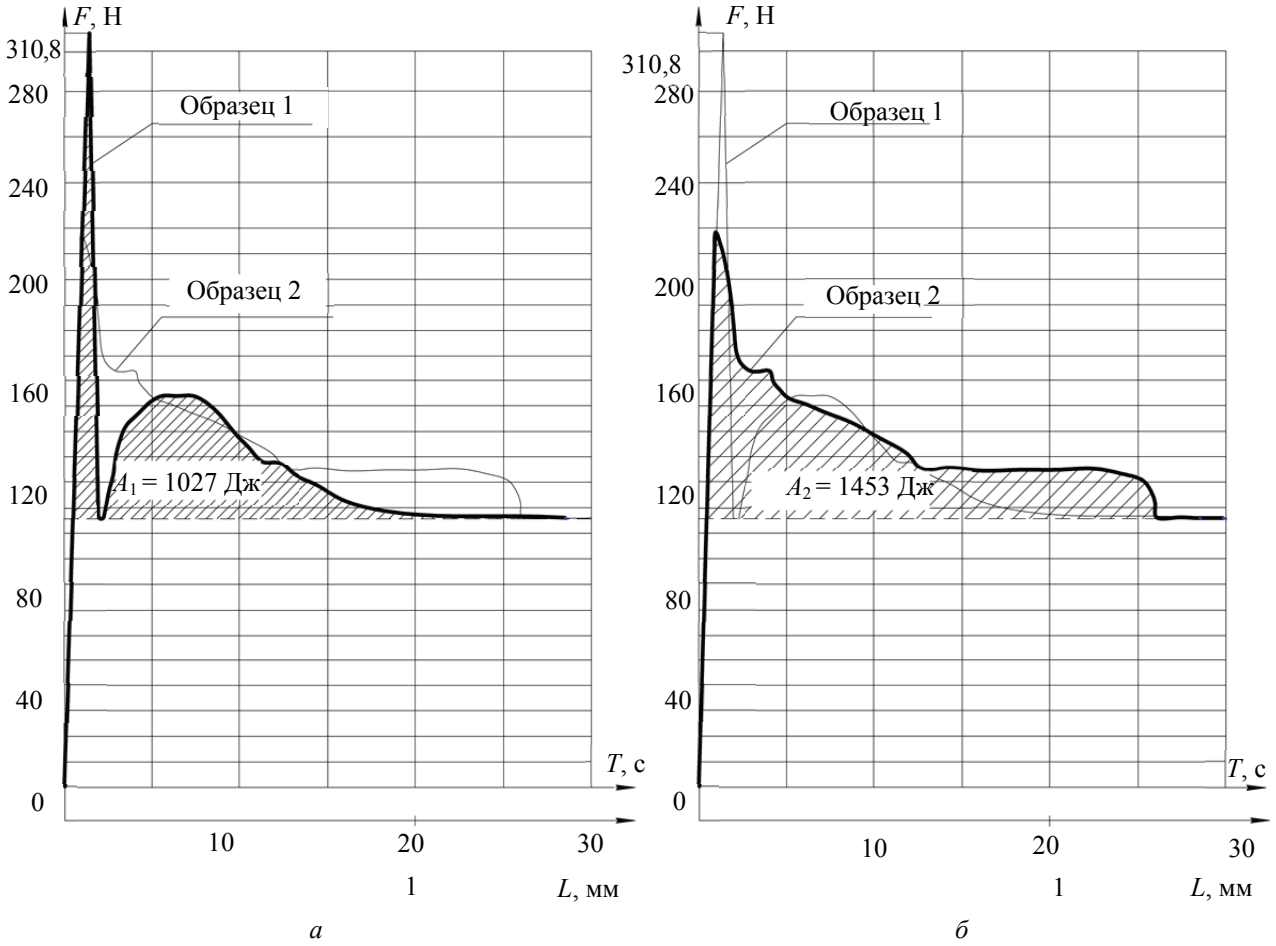


Рис. 7. Результаты эксперимента:
а – работа первого образца; *б* – работа второго образца

До силы F = 106 Н происходит работа по деформированию в соединении, и в работу по удалению продуктов резания она не включалась. В первом случае работа составила A_1 = = 1027 Дж, во втором случае A_2 = 1453 Дж. В зависимости от зернистости шлифовальной шкурки удельная работа составляет A_1 = = 62 Дж/см^2 и A_2 = 90,8 Дж/см^2.

Заключение. Существующие системы очистки шлифовальной шкурки от продуктов резания не являются совершенными и достаточно эффективными, что подтверждается результатами исследования, когда с увеличением пути резания увеличивается мощность шлифования.

Потеря режущей способности шлифовальной шкурки происходит в результате заполнения межзернового пространства, а не в результате округления режущей кромки зерна.

Как видно из графиков, при повышении скорости подачи с 4 м/мин до 6 м/мин не происходит существенного увеличения полезной мощности на резание, а при изменении скорости подачи с 6 м/мин до 8 м/мин и более происходит значительное увеличение полезной мощности. Это свидетельствует о том, что пространство между зернами полностью заполнено продуктами резания, и в результате трения их о поверхность материала заготовки повышается потребляемая мощность, и в критических случаях образуются прижоги.

В зависимости от зернистости шлифовальной шкурки удельная работа составляет A_1 = = 62 Дж/см^2 и A_2 = 90,8 Дж/см^2 для шлифовальных шкурок зернистостью Р150 и Р80 соответственно. Величину этой работы следует учитывать при проектировании систем для очистки шлифовальных инструментов от продуктов резания.

Список литературы

1. Любченко В. И. Резание древесины и древесных материалов: учеб. пособие для вузов. М.: Лесная промышленность, 1986. 296 с.

2. Гришкевич А. А., Костюк О. И. Методика и результаты исследований по удалению продуктов резания с поверхности шлифовальной шкурки // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды X Междунар. евразийского симпоз. Екатеринбург, 2015. С. 156–162.

3. Бершадский А. Л. Резание древесины. Минск: Выш. шк., 1975. 303 с.

4. Костюк О. И. Результаты экспериментальных исследований по определению касательной составляющей силы резания при шлифовании древесины // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2016. № 2. С. 281–284.

5. Гришкевич А. А. Механическая обработка древесины и древесных материалов, управление процессами резания. Лабораторный практикум: учеб.-метод. пособие для вузов. Минск: БГТУ, 2014. 90 с.

References

1. Lyubchenko V. I. *Rezaniye drevesiny i drevesnykh materialov* [Cutting wood and wood material]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1986. 296 p.

2. Grishkevich A. A., Kostyuk O. I. Methodology and results of studies on the removal of cutting products from the surface of the grinding skin. *Trudy X Mezhdunar. yevraziyskogo simpoz. Derevoobrabotka: tekhnologii, oborudovaniye, menedzhment XXI veka.* [Woodworking: technologies, equipment, management of the 21st century. Proceedings of the X Intern. Eurasian symposium], 2015, pp. 156–162 (In Russian).

3. Bershadskiy A. L. *Rezaniye drevesiny* [Wood cutting]. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1975. 303 p.

4. Kostyuk O. I. The results of experimental studies to determine the tangential component of the cutting force when grinding wood. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], serries 1, Forestry and Woodworking Industry, 2016, no. 2, pp. 281–284 (In Russian).

5. Grishkevich A. A. *Mekhanicheskaya obrabotka drevesiny i drevesnykh materialov, upravleniye protsessami rezaniya. Laboratornyy praktikum* [Machining of wood and wood materials, cutting process control. Laboratory practice]. Minsk, BSTU Publ., 2014. 90 p.

Информация об авторах

Гришкевич Александр Александрович − кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dosy@belstu.by

Юдицкий Александр Юрьевич – студент. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dosy@belstu.by

Information about the authors

Grishkevich Alksandr Aleksandrovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dosy@belstu.by

Yuditsky Alexandr Yur'yevich – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dosy@belstu.by

Поступила 07.04.2020

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ ЛЕСАМИ, ЛЕСОУСТРОЙСТВО И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ..... 5

Зорин В. П., Севрук П. В. Устойчивое управление лесами – эколого-экономическая основа «Генерального плана использования территории государства для выращивания лесов и ведения лесного хозяйства»..... 5

Коцан В. В., Толкач И. В., Ильючик М. А., Ковалевский С. В. Практические аспекты применения метода лесного аналитико-измерительного стереодешифрирования для задач лесоустройства..... 10

Севко О. А., Коцан В. В. Анализ влияния пространственной структуры на таксационные показатели в сложном древостое..... 16

Толкач И. В., Мицевич Л. А., Кравченко О. В. Формирование цифровой модели высот древостоев с использованием цифровой фотограмметрической системы PHOTOMOD 22

Толкач И. В., Ожич О. С., Коцан В. В. Использование регрессионных моделей для оценки таксационных показателей древостоев при аналитико-измерительном дешифрировании..... 27

ЛЕСНАЯ ЭКОЛОГИЯ И ЛЕСОВОДСТВО..... 32

Климчик Г. Я., Бельчина О. Г., Шиман Д. В., Юшкевич М. В. Изменение видового разнообразия в сосняках в зависимости от систем рубок главного пользования, лесовосстановления и очистки лесосек от порубочных остатков 32

Комар А. Ю., Цярэшчанка С. С. Сучасны стан экасістэмаў часткі заказніка «Налібоцкі» пад уздзеяннем асушальнай меліярацыі 39

Левковская М. В., Сарнацкий В. В. Влияние механизированных рубок ухода на корненасыщенность почвы сосняков мшистых..... 44

Луферов А. О. Состояние естественного возобновления сосновых насаждений Беларуси в условиях современной хозяйственной деятельности 49

Рожков Л. Н. Влияние ухода за молодняками на породную структуру лесного фонда..... 59

Рожков Л. Н. Годичная абсорбция углекислого газа сосновых древостоев в связи с возрастом 64

ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЕ И ЛЕСОВОЗВЕДЕНИЕ 69

Беспалый А. А., Соколовский И. В. Динамика растительности в дубравах ольхово-пойменной и орляковой Белорусского Полесья при изменении пойменного и почвенно-грунтового водного режимов..... 69

Караневский Р. И., Келько А. Ф., Холопук Г. А. Опыт использования экологически безопасных регуляторов роста при выращивании сеянцев пихты белой (*Abies alba* Mill.) в контейнерах..... 74

Кирьянов П. С. Поиск селективных маркеров, ассоциированных с аномальным ксилогенезом карельской березы (*Betula pendula* Roth. var. *carelica* Merkl.) с использованием высокопроизводительного секвенирования 79

Якимов Н. И., Гвоздев В. К., Юреня А. В. Опыт реконструкции малоценных насаждений лесными культурами ели европейской 86

ЛЕСОЗАЩИТА И САДОВО-ПАРКОВОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО..... 91

Волосач М. В. Сравнительная повреждаемость спиреи Вангутта (*Spiraea* × *Vanhouttei* (Briot) Zabel) личинками минирующей мухи *Agromyza spiraeoidearum* Hering, 1954 в зеленых насаждениях Минска и Гомеля..... 91

Иванова М. А., Федченко Е. И., Хамитова С. М. Оценка загрязненности почв и распространенности пороков древесины в насаждениях на урбанизированных территориях..... 94

Кухта В. Н. Сазонов А. А., Бабуль Д. А. Применение порубочных остатков в качестве ловчего материала на сосновых вырубках 100

Машкин И. А., Корытько Л. А., Шуканов В. П. Влияние защитно-стимулирующих препаратов на болезнеустойчивость и качественные характеристики сеянцев ели (*Picea abies*) с закрытой корневой системой 109
Пантелеев С. В., Баранов О. Ю., Звягинцев В. Б., Ярук А. В. Генетическое разнообразие инвазивного аскомицета *Hymenoscyphus fraxineus* Baral et Al. на территории Беларуси 120

ТУРИЗМ И ЛЕСООХОТНИЧЬЕ ХОЗЯЙСТВО 130

Андреева В. Л. Основы разработки мультифункциональной учебной экологической тропы 130
Подошвелев Д. А. Содержание фотосинтетических пигментов и активность фермента пероксидазы в хвое сосны в условиях интенсивного техногенного воздействия 139
Шапорова Я. А., Бахур О. В. Комплексный подход в создании сырьевой базы для пчеловодства и травничества 144

ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС. ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ 149

Столбин В. С., Голякевич С. А. Анализ научных исследований в области оценки экологического воздействия лесопромышленных машин и технологий на лесные экосистемы 149
Голякевич С. А., Карсюк Р. А. Оценка потенциала рекуперации энергии в процессе валки дерева харвестером 160
Голякевич С. А., Асмоловский М. К., Станкевич Е. А. Концепция применения малогабаритного лесохозяйственного трактора с электросиловым приводом для механизации работы в теплицах лесопитомников 168
Хорошун Н. В., Насковец М. Т. Обоснование параметров усовершенствованной конструкции навесной трамбовочной вибрационной плиты с шириной рабочей зоны до 4,0 м 174
Протас П. А., Шошин А. О., Мисуно Ю. И. Специфика разработки ветровально-буреломных лесосек на заболоченных участках лесного фонда 181
Леонов Е. А., Клоков Д. В., Гарабажиу А. А., Духовник А. А. Влияние сроков хранения древесного сырья и топливной щепы на их теплотворную способность 186
Кононович Д. А., Арико С. Е., Мохов С. П., Асмоловский М. К. Математическая модель работы комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов 192
Исаченков В. С., Симанович В. А. К вопросу выбора типа прицепного технологического оборудования колесных трелевочных машин 199
Исаченков В. С., Симанович В. А. К вопросу влияния природно-климатических условий на производительность колесных трелевочных машин 205

ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ 210

Полховский А. В., Прохорчик С. А., Шетько С. В., Ручкина Е. В. Исследование материалов, применяемых для изготовления спортивно-беговых пластиковых лыж 210
Шетько С. В., Игнатович Л. В., Гайдук С. С., Чуйков А. С. Применение технологии печати для имитации текстуры ценных пород древесины при производстве мебели 217
Барташевич А. А., Игнатович Л. В., Утгоф С. С. Расчет тепловых и деформационных параметров режимов склеивания слоистых композиционных древесных материалов 223
Барташевич А. А., Билош Л. Г., Утгоф С. С. О связи объемного разбухания древесины с прочностью клеевых соединений 229
Рудак О. Г. Исследование явления термовлагопроводности при прогреве древесины в ненасыщенной среде 233
Федосенко И. Г., Веретиков И. И. Применение коры деревьев в производстве изолирующих и конструкционных плит 239
Бовтрель А. Ю., Божелко И. К., Клюев А. Ю., Скаковский Е. Д., Дубоделова Е. В. Оценка антисептических свойств составов на основе канифоли 244

ОБЩЕИНЖЕНЕРНЫЕ ВОПРОСЫ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА 254

Азовская Н. О., Перетрухин В. В., Чернушевич Г. А. Проблемы использования древесных отходов в малой энергетике Беларуси 254

Ермак И. Т., Гармаза А. К. Анализ результатов аттестации рабочих мест по условиям труда рабочих основных профессий на рубках леса 260
Кунтыш В. Б., Сухоцкий А. Б., Маршалова Г. С., Фарафонтов В. Н. Экспериментальное исследование влияния температурного фактора на теплоотдачу теплообменных секций аппаратов воздушного охлаждения природного газа 267
Левкевич В. Е., Касперов Г. И., Тризнюк Я. В. Лабораторные исследования процесса переноса химических загрязнителей в водных объектах 273
Карпович С. С., Карпович С. И. Расчетный метод определения оптимальных параметров заточки дереворежущего инструмента 279
Левитан В. Б., Бельский С. Е., Пищов М. Н., Вергейчик А. В., Пивоварчик К. В. Исследование прочности сварных соединений комбинированного инструмента 287
Аникеенко А. Ф., Машорипова Т. А. Применение упругих элементов в конструкции нового адаптивного сверлильного инструмента 293
Гаранин В. Н., Болочко Д. Л. Обоснование скорости резания древесины с использованием модели обработки анизатропного материала 299
Машорипова Т. А., Аникеенко А. Ф. Повышение эффективности эксплуатации оборудования при сверлении новым адаптивным инструментом 306
Гришкевич А. А., Гриневич С. А., Алифировец Г. В. Увеличение периода стойкости ножей профиляторов фрезерно-брусующих станков 312
Клепацкий И. К., Раповец В. В. Промышленные испытания модифицированных ножей в агрегатной переработке древесины 316
Раповец В. В., Медведев С. В., Клепацкий И. К. Вычислительные эксперименты с высокой детализацией для моделирования процессов фрезерования древесных материалов 320
Гриневич С. А., Гришкевич А. А., Волкович Д. С. К вопросу обеспечения безопасности при эксплуатации круглопильного оборудования 325
Раковец А. С., Куис Д. В., Свидунович Н. А., Лежнев С. Н. Влияние наноуглеродных добавок в составе комплексных модификаторов на структуру и свойства высокопрочного чугуна 330
Гришкевич А. А., Юдицкий А. Ю. Результаты исследований, определяющие критические режимы шлифования древесины 336

CONTENTS

FOREST MANAGEMENT, FOREST INVENTORY AND INFORMATION SYSTEMS IN FORESTRY **5**

Zorin V. P., Sevruk P. V. Sustainable forest management – environmental and economic basis of the "Master plan for using the state territory for forest growing and forest management" 5

Kotsan V. V., Tolkach I. V., Il'yuchik M. A., Kovalevskiy S. V. Practical aspects of application of the forest analytical-measuring stereo-decoding method for tasks of forest management 10

Sevko O. A., Kotsan V. V. Analysis of the influence of spatial structure on taxation indicators in complex tree 16

Tolkach I. V., Mitsevich L. A., Kravchenko O. V. Formation of the digital altitude model trees with use digital photogrammetric system PHOTOMOD 22

Tolkach I. V., Ozhich O. S., Kotsan V. V. The use of regression models for assessing taxation indicators of stand during analitical and measuring interpretation 27

FOREST ECOLOGY AND SILVICULTURE 32

Klimchik G. Ya., Bel'chyna O. G., Shyman D. V., Yushkevich M. Yu. Change of species diversity in pineies depending on main use systems, forest recovery and cleaning of forestry from cutting residues 32

Komar A. Yu., Tereshchenko S. S. Current state of ecosystems of the Naliboksky reserve under the influence of drainage reclamation 39

Levkovskaya M. V., Sarnatsky V. V. Influence of mechanized thinning on root mass in moss-covered pine forests 44

Luferov A. O. State of natural regeneration of pine stands of Belarus under conditions of modern economic activity 49

Rozhkov L. N. Influence of care for young forests on related structure of forest fund 59

Rozhkov L. N. Annual age-related absorption of carbon dioxide by pine stands 64

FOREST REGENERATION AND FOREST GROWING **69**

Bespalyy A. A., Sokolovskiy I. V. Vegetation dynamics in the oaks of alder-floodplain and orlyakova Belarusian Polesie when changing the floodplain and soil-ground water regimes 69

Karaneuski R. I., Kelko H. F., Kholopuk G. A. Experience of applying of environmentally safe growth regulators while growing seedlings of white fir (*Abies alba* Mill.) in containers 74

Kiryanov P. S. Search for selectable markers associated with anomalous xylogenesis of the curly birch using next-generation sequencing (*Betula pendula* Roth. var. *carelica* Merkl.) 79

Yakimov N. I., Gvozdev V. K., Yurenya A. V. Experience in reconstruction of low-value forest plantations of european spruce 86

FOREST PROTECTION AND LANDSCAPING **91**

Volosach M. V. The comparative level of damage caused to Vanhoutte spirea (*Spiraea* × *Vanhouttei* (Briot) Zabel) by mining fly *Agromyza spiraeoidearum* Hering, 1954 larvae in green areas of Minsk and Gomel 91

Ivanova M. A., Fedchenko E. I., Khamitova S. M. Assessment of the soil contamination and prevalence of wood defects in plantings on urbanized territories 94

Kukhta V. N., Sazonov A. A., Babul D. A. Application of logging residues as trap material on pine felling 100

Mashkin I. A., Korytsko L. A., Shukanov V. P. The effect of protective-stimulating products on personal instability and qualitative characteristics of spruce (*Picea abies*) seedlings with closed root system 109

Panteleev S. V., Baranov O. Yu., Zviagintsev V. B., Yaruk A. V. Genetic diversity of invasive ascomycete fungus *Hymenoscyphus fraxineus* Baral et al. in the territory of Belarus 120

TOURISM AND FOREST HUNTING 130

Andreeva V. L. Bases of development of a multifunctional educational ecological trail 130
Podoshvelev D. A. The content of photosynthetic pigments and the activity of the enzyme peroxidase in pine needles in conditions with intensive technogenic exposure..... 139
Shaporova Ya., Bakhur A. To the question about the raw material base for the development of human bearing and herbality..... 144

TIMBER PROCESSING COMPLEX. TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL QUESTIONS.... 149

Stolbin V. S., Golyakevich S. A. Analysis of scientific research in the assessment of ecological influence of forestry machines and technologies on forest ecosystems..... 149
Golyakevich S. A., Karsyuk R. A. Assessment of the potential energy recovery in felling a tree harvester..... 160
Golyakevich S. A., Asmolovskiy M. K., Stankevich Ye. A. The concept of a small size forestry tractor with electric power drive for mechanization of work in greenhouses of forestry 168
Khoroshun N. V., **Naskovets M. T.** Justification of parameters of the improved design of the hinged tamper vibration plate with a working area no more than 4.0 meters 174
Protas P. A., Shoshyn A. O., Misuno Yu. I. The specifics of the working out of windfall-windbreak areas on the swampy sites of the forest fund..... 181
Leonov E. A., Klokov D. V., Garabazhiu A. A., Dukhovnik A. A. Influence of the wood raw materials and fuel chips storage terms on their heating ability..... 186
Kononovich D. A., Ariko S. Ye., Mokhov S. P., Asmolovskiy M. K. Mathematical model of work of the complex of machines for collection and transportation of forestry wastes 192
Isachenkov V. S., Simanovich V. A. To the question of choosing a type of trailed technological equipment of skidders..... 199
Isachenkov V. S., Simanovich V. A. To the question of the influence of natural-climatic conditions on the productivity of skidders..... 205

WOODWORKING INDUSTRY 210

Polkhovskiy A. V., Prokhorchik S. A., Shet'ko S. V., Ruchkina E. V. Research of materials used for manufacturing sports-running plastic skis 210
Shet'ko S. V., Ignatovich L. V., Haiduk S. S., Chuikov A. S. Application of printing technology to imitate the texture of precious wood in the furniture production..... 217
Bartashevich A. A., Ignatovich L. V., Utgof S. S. Research of features of structural changes of compacted alder wood for manufacture of joint-and-construction products and construction elements of furniture 223
Bartashevich A. A., Bilash L. G., Utgof S. S. On the relationship of volumetric wood swelling with the strength of adhesive joints..... 229
Rudak O. G. Research of the phenomenon of thermal conductivity during wood heating in unsaturated medium..... 233
Fedosenko I. G., Veretikov I. I. Application of tree bark in the production of insulating and structural plates..... 239
Bovtrel' A. Yu., Bozhelko I. K., Klyuev A. Yu., Skakovskiy E. D., Dubodelova Ye. V. Assessment of antiseptic properties of compositions based on rosin..... 244

ALL-ENGINEERING QUESTIONS OF TIMBER PROCESSING COMPLEX 254

Azovskaya N. O., Peretrukhin V. V., Chernushevich G. A. Problems of using wooden waste in Belarus's small power engineering..... 254
Yermak I. T., Garmaza A. K. Analysis of job certifications on working conditions of primary professions in felling industry..... 260
Kuntysh V. B., Sukhotski A. B., Marshalova G. S., Farafontov V. N. Experimental research of influence of the temperature factor on heat transfer of sections of air cooled heat exchangers of natural gaz..... 267
Levkevich V. Ye., **Kasperov G. I.**, **Triznyuk J. V.** Laboratory tests of chemical contaminants transfer in water bodies..... 273

Karpovich S. S., Karpovich S. I. Calculation method for determining optimal parameters for sharpening wood-cutting tools 279
Levitan V. B., Belsky S. Ye., Pishchov M. N., Vergeichik A. V., Pivavarchyk K. V. Research of strength of welded compounds of combined tool 287
Anikeenko A. F., Mashoripova T. A. Application of elastic elements in the design of a new adaptive drilling tool 293
Garanin V. N., Bolochko D. L. Increasing the cutting speed during wood booster milling 299
Mashoripova T. A., Anikeenko A. F. Improving the efficiency of equipment operation when drilling chipboards 306
Grischkevich A. A., Grinevich S. A., Alifirovets G. V. Increasing the period of resistance of knives of profilers of milling and brushing machines 312
Klepatski I. K., Rapovets V. V. Industrial tests of modified knives in the aggregate processing of wood 316
Rapovets V. V., Medvedev S. V., Klepatski I. K. Industrial tests of modified knives in the aggregate processing of wood 320
Grinevich S. A., Grishkevich A. A., Volkovich D. S. On the issue of ensuring safety at the usage of circular saw equipment 325
Rakovets A. S., Kuis D. V., Svidunovich N. A., Lezhnev S. N. Influence of nanocarbon components in the composition of complex modifiers on structure and properties of high-strength cast iron 330
Grishkevich A. A., Yuditsky A. Yu. Critical research results wood grinding modes 336

Редакторы: *О. П. Приходько, Ю. Д. Нежикова*
Компьютерная верстка: *Д. С. Жих, А. А. Селиванова*
Корректоры: *О. П. Приходько, Ю. Д. Нежикова*

Подписано в печать 13.07.2020. Формат 60×84 $^{1}/_{8}$.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 40,6. Уч.-изд. л. 44,3.
Тираж 100 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение:
УО «Белорусский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/227 от 20.03.2014.
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.