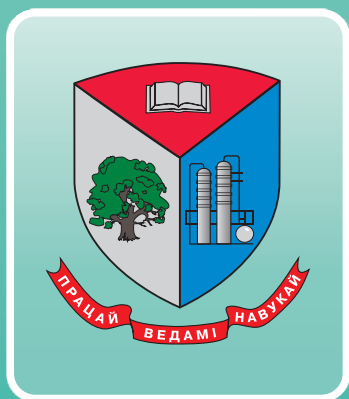


ISSN 2519-402X



ТРУДЫ БГТУ

Научный журнал



Серия 1

**ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО,
ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ
И ПЕРЕРАБОТКА
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ РЕСУРСОВ**

№ 2 (270) 2023 год

Рубрики номера:

Управление лесами, лесоустройство
и информационные системы в лесном хозяйстве

Лесная экология и лесоводство

Лесовосстановление и лесоразведение

Лесозащита и садово-парковое строительство

Туризм и лесохотничье хозяйство

Лесопромышленный комплекс.
Транспортно-технологические вопросы

Деревообрабатывающая промышленность

Общеинженерные вопросы
лесопромышленного комплекса



БГТУ

Минск 2023

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 (270) 2023 год

Выходит два раза в год

Минск 2023

Учредитель – учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

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

Редакционная коллегия журнала:

Шетько С. В., кандидат технических наук, доцент (заместитель главного редактора), Республика Беларусь;
Жарский И. М., кандидат химических наук, профессор (заместитель главного редактора), Республика Беларусь;
Черная Н. В., доктор технических наук, профессор, Республика Беларусь;
Прокопчук Н. Р., член-корреспондент НАН Беларуси, доктор химических наук, профессор, Республика Беларусь;
Водопоьянов 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;
Куликович В. И., кандидат филологических наук, доцент, Республика Беларусь;
Торчик В. И., доктор биологических наук, Республика Беларусь;
Барчик Стэфан, доктор наук, профессор, Словацкая Республика;
Жантасов К. Т., доктор технических наук, профессор, Республика Казахстан;
Харша Ратнавира, доктор наук, профессор, Королевство Норвегия;
Пайвинен Ристо, доктор наук, профессор, Финляндская Республика;
Кох Барбара, доктор наук, профессор, Федеративная Республика Германия;
Лакида П. И., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Украина;
Головко М. Ф., член-корреспондент НАН Украины, доктор физико-математических наук, профессор, Украина;
Щекин А. К., член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, Российская Федерация;
Маес Воутер, доктор химических наук, профессор, Королевство Бельгия;
Бир Петр, доктор технических наук, профессор, Республика Польша;
Горинштейн Ш., доктор наук, профессор, Государство Израиль;
Эркаев А. У., доктор технических наук, профессор, Республика Узбекистан;
Башкиров В. Н., доктор технических наук, профессор, Российская Федерация;
Каклаускас А., доктор экономических наук, профессор, Литовская Республика;
Каухова И. Е., доктор фармацевтических наук, профессор, Российская Федерация;
Хассель Л. Г., доктор наук, профессор, Королевство Швеция;
Флюрик Е. А., кандидат биологических наук, доцент (секретарь), Республика Беларусь.

Редакционная коллегия серии:

Черная Н. В., доктор технических наук, профессор (главный редактор серии), Республика Беларусь;
Козлов Н. Г., доктор химических 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;
Шетько С. В., кандидат технических наук, доцент, 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;
Бабай Б. Я., кандидат технических наук, доцент, Украина;
Герц Э. Ф., доктор технических 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;
Валентиниане Инга, кандидат технических наук, доцент, Литовская Республика;
Усенья 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;
Петр Коледа, доктор наук, профессор, Словацкая Республика;
Золтан Пастори, доктор наук, профессор, Венгрия;
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) 343-94-32;

главного редактора серии – (+375 17) 374-80-46.

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»

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. 1 (270) 2023

Published biannually

Minsk 2023

Publisher – educational institution “Belarusian State Technological University”

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

Editorial (Journal):

Shet’ko S. V., PhD (Engineering), Associate Professor (deputy editor-in-chief), Republic of Belarus;
Zharskiy I. M., PhD (Chemistry), Professor (deputy editor-in-chief), Republic of Belarus;
Chernaya N. V., 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;
Kulikovich V. I., PhD (Philology), Associate Professor, Republic of Belarus;
Torchik V. I., DSc (Biology), Republic of Belarus;
Barcik Štefan, DSc, Professor, Slovak Republic;
Zhantasov K. T., DSc (Engineering), Professor, Republic of Kazakhstan;
Harsha Ratnaweera, DSc, Professor, Kingdom of Norway;
Paivinen Risto, DSc, Professor, Republic of Finland;
Koch Barbara, DSc, Professor, Federal Republic of Germany;
Lakida P. I., DSc (Agriculture), Professor, Ukraine;
Golovko M. F., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, DSc (Physics and Mathematics), Professor, Ukraine;
Shchekin A. K., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Physics and Mathematics), Professor, Russian Federation;
Maes Wouter, DSc (Chemistry), Professor, Kingdom of Belgium;
Beer Piotr, DSc (Engineering), Professor, Republic of Poland;
Gorinshteyn Sh., DSc, Professor, State of Israel;
Erkayev A. U., DSc (Engineering), Professor, Republic of Uzbekistan;
Bashkirov V. N., DSc (Engineering), Professor, Russian Federation;
Kaklauskas A., DSc (Economics), Professor, Republic of Lithuania;
Kaukhova I. E., DSc (Pharmaceutics), Professor, Russian Federation;
Hassel L. G., DSc, Professor, Kingdom of Sweden;
Flyurik E. A., PhD (Biology), Associate Professor (secretary), Republic of Belarus.

Editorial (Issue):

Chernaya N. V., DSc (Engineering), Professor (managing editor), Republic of Belarus;
Kozlov N. G., DSc (Chemistry), 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;
Shet’ko S. V., PhD (Engineering), Associate 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;
Babay B. Ya., PhD (Engineering), Associate Professor, Ukraine;
Gerts E. F., DSc (Engineering), Professor, Russian Federation;
Paivinen Risto, DSc, Professor, Republic of Finland;
Saeovich K. F., DSc (Biology), Professor, Republic of Belarus;
Sarnatskiy V. V., DSc (Biology), Republic of Belarus;
Valentiniane Inga, PhD (Agriculture), Associate 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;
Barcik Štefan, DSc, Professor, Slovak Republic;
Petr Koleda, DSc, Professor, Slovak Republic;
Zoltán Pásztor, DSc, Professor, Hungary;
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) 343-94-32;

managing editor (+375 17) 374-80-46.

E-mail: root@belstu.by, <http://www.belstu.by>

УПРАВЛЕНИЕ ЛЕСАМИ, ЛЕСОУСТРОЙСТВО И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

FOREST MANAGEMENT, FOREST INVENTORY AND INFORMATION SYSTEMS IN FORESTRY

УДК 630*232

О. А. Севко¹, В. В. Коцан¹, А. А. Мусский²

¹Белорусский государственный технологический университет

²РУП «Белгослес»

ВЛИЯНИЕ ВНУТРИВИДОВОЙ И МЕЖВИДОВОЙ КОНКУРЕНЦИИ НА ТАКСАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДРЕВЕСНЫХ ПОРОД В СЛОЖНОМ ДРЕВОСТОЕ

В исследовании рассмотрены вопросы воздействия пространственной структуры сложного древостоя на его таксационные показатели. Межвидовые отношения в древостое оценивались на основании регрессионного анализа. Определены уравнения зависимости диаметра, высоты и радиального прироста стволов сосны и ели от таксационных показателей соседних деревьев различных пород и их размещения по площади.

Инструментально оценен радиальный прирост деревьев сосны и ели, а также выявлена его зависимость от изменения пространственной структуры древостоя в результате проведенной рубки. Точность исследования обусловлена использованием возможностей QGIS для обработки данных отсканированных кернов.

В результате обработки данных выявлено увеличение радиального прироста исследуемых стволов от 16 до 53% у ели и от 15 до 50% у сосны. Также анализ полученных данных показал, что прирост по объему после рубки для деревьев ели увеличился от 15 до 45%, что характеризует значительное влияние проведенной рубки. Для сосны увеличение прироста по объему варьирует от 1 до 35%.

Ключевые слова: текущий прирост, пространственная структура, сложный древостой, регрессионный анализ.

Для цитирования: Севко О. А., Коцан В. В., Мусский А. А. Влияние внутривидовой и межвидовой конкуренции на таксационные показатели древесных пород в сложном древостое // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 5–13. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-1.

O. A. Sevko¹, V. V. Kotsan¹, A. A. Musskiy²

¹Belarusian State Technological University

²Republican Unitary Enterprise “Belgosles”

THE IMPACT OF INTRASPECIFIC AND INTERSPECIFIC COMPETITION ON THE TAXATION INDICATORS OF TREE SPECIES IN A COMPLEX TREE STAND

The study examines the impact of the spatial structure of a complex tree stand on its taxation indicators. Interspecific relationships in stands were evaluated based on regression analysis. The equations of the dependence of the diameter, height and radial growth of pine and spruce trunks on the taxation indicators of neighboring trees of various breeds and their placement by area are determined.

The radial growth of pine and spruce trees has been instrumentally assessed, and its dependence on changes in the spatial structure of the stand as a result of logging has been revealed. The accuracy of the study is due to the use of Quantum GIS capabilities for processing scanned core data.

As a result of data processing, an increase in the radial growth of the studied trunks was revealed from 16 to 53% in spruce, and from 15 to 50% in pine. The calculation of the increase in the volume of the studied trunks showed that the increase in volume after felling for spruce trees increased from 15 to 45%, which characterizes the significant impact of the felling. For pine, the increase in volume growth varies from 1 to 35%.

Keywords: current growth, spatial structure, complex tree stand, regression analysis.

For citation: Sevko O. A., Kotsan V. V., Musskiy A. A. The impact of intraspecific and interspecific competition on the taxation indicators of tree species in a complex tree stand. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 5–13. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-1 (In Russian).

Введение. Исследования межвидовых и внутривидовых отношений между деревьями в сложных древостоях позволяет выявить степень их влияния на таксационные показатели деревьев различных пород, а также возможность воздействия на прирост древостоя при проведении рубок в нем. В исследовании А. А. Вайса отмечено, что отношения между деревьями различных пород оцениваются либо без учета характеристик центрального дерева, но с выявлением оптимального радиуса влияния; либо с учетом характеристик центрального дерева, но без выявления оптимального радиуса влияния [1].

В. А. Усольцев и М. М. Семышев в своих работах объединили оба подхода. Они оценили влияние нескольких показателей конкуренции на фитомассу и прирост ствола с учетом его таксационных характеристик, при этом установили оптимальный радиус влияния [2].

В исследованиях ряда авторов для оценки внутривидовых и межвидовых отношений, а также конкуренции между произрастающими рядом деревьями используется показатель, дающий количественное выражение конкурентных отношений. В работах С. Н. Сеннова, В. В. Копана, О. А. Севко предлагается использовать индекс конкуренции (СІ) для вычисления изменчивости биологической продуктивности деревьев в насаждении [3–6].

При этом использование понятия «пространственная структура» и ее учет при оценке взаимоотношений внутри древостоя становятся закономерными [1, 2, 6, 7].

В результате исследований смешанных насаждений В. Я. Грибанов и И. В. Прокопцев пришли к выводу, что горизонтальная структура в молодых и средневозрастных насаждениях соответствует групповому распределению, а в спелых и созревающих лесах наблюдается равномерное расположение растений [8].

Динамика таксационных показателей в сложных сосново-березовых насаждениях исследуется во многих белорусских и зарубежных литературных источниках [9–11]. Актуальность данных исследований обуславливается большей устойчивостью этих древостоев к заболеваниям

и вредителям, чем чистых сосняков. Анализ динамики усыхания чистых и смешанных сосновых древостоев в условиях массового повреждения, проведенный А. В. Пупенко и О. А. Севко, показал большую устойчивость смешанных древостоев. При практически равных долях чистых и смешанных древостоев в лесном фонде исследуемых лесхозов в подавляющем большинстве случаев (91%) усыхают чистые сосновые древостои [12].

В работах И. Н. Рахтеенко указывается, что, являясь основной сопутствующей породой в сосновых насаждениях, береза оказывает значительное влияние на сосновую часть древостоя [13], при этом характер влияния березовой части на развитие деревьев сосны в сложных и смешанных насаждениях зависит в большей степени от состава насаждений. Оптимальной считается примесь до 20–30% березы. В этом случае она оказывает положительное влияние на рост и развитие сосны, выступая в качестве здорового конкурента и подгона. Увеличение примеси березы в составе древостоя оказывает угнетающее действие на сосну.

Однако в спелом возрасте для сосново-березовых древостоев характерно появление жизнеспособного подроста ели с последующим образованием второго яруса. Исследования О. А. Неволина и О. О. Ереминой подтверждают данный тезис [14]. При этом характерен переход в сложные насаждения только при развитии елового подроста, так как ель является теневыносливым древесным видом.

Естественное возобновление ели в подзоне грабово-дубово-темнохвойных лесов и дубово-темнохвойных лесов рассмотрено в работах К. В. Лабохи и Д. В. Шимана [15]. Авторы пришли к выводу, что под пологом приспевающих и спелых насаждений естественное возобновление ели обеспечивается на 47,7 и 45,5% соответственно.

В изданиях В. Н. Коновалова и В. Л. Зарубиной [16, 17], исследовавших изменения жизнедеятельности ели в чернично-березовом лесу, отмечено, что максимальная скорость роста ели наблюдается в 8-летнем березняке. С увеличением возраста березы ель из второго яруса показывает

дефицит солнечной энергии, что приводит к снижению ростовых процессов. Самый низкий рост и развитие у ели наблюдается при достижении зрелости березы. Для поддержания высокой жизнедеятельности ели в березовых лесах необходимо своевременно проводить сопутствующие рубки ухода.

Остается актуальным вопрос оценки проводимых в сложных древостоях хозяйственных мероприятий и их влияния на таксационные показатели растущей части древостоя, а также численного выражения внутривидовой и межвидовой конкуренции в древостое.

Основная часть. Исследование внутривидовой и межвидовой конкуренции на таксационные показатели древесных пород проводилось в сложном сосново-березовом древостое со вторым ярусом ели. Данные для анализа были получены в 27-м выделе 50-го квартала Негорельского учебно-опытного лесхоза, который представляет собой постоянную пробную площадь № 24 кафедры лесоустройства, заложенную в 1998 г. Повторные исследования стационара проводились в 2003, 2009, 2012, 2014 и 2020 гг. В 2013 г., после ветровала, часть пострадавших стволов была вырублена.

На пробной площади в начале исследования присутствовало 370 деревьев сосны, березы, ели и осины. На данный момент на пробной площади находится 331 дерево, причем за прошедший период подрост ели, который присутствовал в 1998 г. частично перешел во второй ярус. При этом незначительно изменился породный состав: сократилось количество деревьев осины и березы вследствие ветровала 2013 г., увеличилось количество ели в результате ее перехода из подростка во второй ярус (табл. 1).

При каждом исследовании на пробной площади для каждого дерева определялись порода, координаты X и Y в условной системе координат, возраст, состояние по Крафту, два перпендикулярных диаметра на высоте 1,3 м с вычислением среднего (D), высота ствола (H), четыре перпендикулярных радиуса крон (R) с вычислением среднего радиуса кроны (K) и ее протяженность. Более 20 лет наблюдений позволяют с определенной достоверностью говорить о приросте стволов. В ходе исследования по разнице значений диаметров стволов был рассчитан годичный и средний радиальный прирост за этот период (Z).

На основании данных координат деревьев с помощью компонентов QGIS в результате обработки была сформирована карта-схема расположения деревьев на постоянной пробной площади (рис. 1).

Данная электронная карта отображает пространственное расположение деревьев и содержит

атрибутивные данные об их таксационной характеристике, что позволяет в дальнейшем использовать возможности ГИС для определения параметров пространственной структуры и построения регрессионных уравнений связи с таксационными показателями исследуемых деревьев. Дополнительные слои позволяют построить карты перекрытий кругов конкуренции, диаметры которых были приняты равными среднему диаметру крон, а также карту перекрытия самих крон.

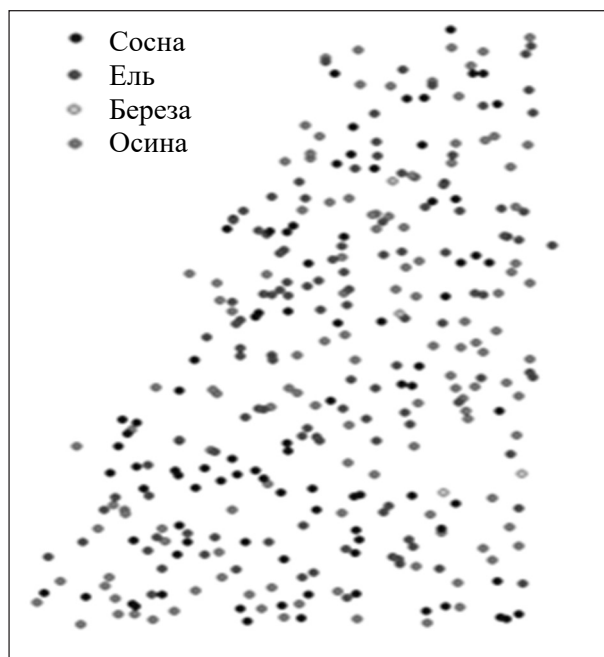


Рис. 1. Цифровая карта пробной площади

С помощью электронной карты на первом этапе были отобраны стволы, находящиеся либо рядом с пнями, либо под видимым воздействием соседних деревьев, т. е. наблюдалось перекрытие их крон и кругов конкуренции соседних деревьев.

Для первых с помощью приростного бура были получены керны для последующего детального исследования прироста. Для вторых определялись ближайшие деревья-соседи, находящиеся в круге влияния или круге конкуренции центральных деревьев.

Для всех деревьев, которые влияют на исследуемое, с помощью инструментов QGIS измерялись расстояния до него (L), которые в последствии вместе со всеми ранее определенными таксационными показателями соседних деревьев заносились в сводную таблицу для анализа с помощью пакета программ Statistica 13. На основании собранных данных проводился анализ внутри- и межвидового влияния деревьев друг на друга, а также влияния отпада или возможных рубок отдельных деревьев на соседние.

Таблица 1

Таксационные показатели древостоя в 2022 г.

Порода	Средние показатели растущего древостоя					Средние показатели сухостоя	
	Возраст, лет	Диаметр, см	Высота, м	Сумма площадей сечений, м ²	Запас, м ³	Сумма площадей сечений, м ²	Запас, м ³
Сосна	69	32,1	26,1	23,7	281,9	0,2	3,0
Ель	49	22,2	17,1	7,4	85,4	0	0
Береза	64	32,5	25,9	16,4	205,1	0,2	7,7
Осина	64	37,2	25,7	0,5	6,7	0	0
Всего	–	–	–	48,1	579,1	0,9	10,7

Анализ отобранных в качестве «центральных деревьев» сосен показал, что у большинства радиальный прирост за 10 лет составил 8–10 мм, минимум деревьев представлен с приростом 12–14 и 16–18 мм. Высота отобранных деревьев сосны варьирует от 23 до 26 м, диаметр от 18 до 38 см, при этом максимум центральных сосен представлен с радиусом кроны 6,0–6,5 м. Расстояние от центральных сосен до соседних деревьев чаще всего составляет от 4 до 6 м, реже 1–2 или 9–10 м.

С помощью регрессионного анализа было оценено влияние пространственной структуры и средних таксационных показателей соседних деревьев на таксационные показатели центральных деревьев сосны (диаметр D , высота H , радиальный прирост Z и средний радиус крон K (табл. 2)).

Результаты расчетов показывают, что влияние деревьев сосны друг на друга в данном насаждении не велико (коэффициенты детерминации не более 0,541), в приспевающем древостое достаточно большие расстояния между стволами не позволяют оказывать влияние друг на друга. Влияние соседних сосен значимо лишь на диаметры крон центральных деревьев. Это

лишний раз доказывает, что данный параметр можно оценивать в пределах кругов конкуренции. Аналогично малое влияние на центральные деревья сосны оказывается соседними деревьями березы. Однако между таксационными показателями соседних деревьев ели и центральных сосен в насаждении наблюдается тесная корреляция, а следовательно, и конкурентное взаимодействие (коэффициенты детерминации для уравнений связи диаметров стволов и радиусов крон с пространственной структурой составляют соответственно 0,907 и 0,936).

Аналогичное исследование было проведено для центральных деревьев ели. Наибольшее количество стволов имеет за 10 лет радиальный прирост от 18 до 20 мм, наименьшее количество – 24–26 мм. Диаметры центральных елей варьируют от 11,5 до 14 см, высота – от 16 до 21 м, радиусы крон – от 1,5 до 7,0 м. При этом расстояние от центральных елей до соседних деревьев изменяется от 1,5 до 6 м. Найдены зависимости таксационных показателей деревьев ели от средних значений таксационных показателей соседних деревьев (табл. 3).

Таблица 2

Модели зависимости таксационных показателей центральных деревьев сосны от параметров соседних деревьев

Показатель	Модель	Дисперсия D	Коэффициент детерминации R^2
От соседних деревьев сосны			
Z_{c1}	$b_0 + b_1 / L_c^3 + b_2 / D_{c1}^3 + b_3 \cdot H_{c1}^3$	0,258	0,508
D_{c1}	$b_0 + b_1 / L_c + b_2 \cdot D_{c1} + b_3 \cdot H_{c1}$	0,293	0,541
H_{c1}	$b_0 + b_1 \cdot L_c + b_2 \cdot D_{c1} + b_3 \cdot H_{c1} + b_4 / R_{c1}$	0,071	0,267
K_{c1}	$b_0 + b_1 \cdot L_c^2 + b_2 \cdot D_{c1} + b_3 \cdot H_{c1} + b_4 / R_{c1}$	0,459	0,677
От соседних деревьев березы			
Z_{c2}	$b_0 + b_1 \cdot L_c + b_2 / D_{c2}^2 + b_3 / H_{c2}^3 + b_4 / R_{c2}^4$	0,211	0,460
D_{c2}	$b_0 + b_1 \cdot L_c^2 + b_2 / D_{c2}^3 + b_3 / H_{c2}^4 + b_4 \cdot R_{c2}^5$	0,256	0,506
H_{c2}	$b_0 + b_1 \cdot L_c + b_2 \cdot D_{c2}^3 + b_3 / H_{c2}^4 + b_4 / R_{c2}^5$	0,640	0,800
K_{c2}	$b_0 + b_1 \cdot L_c^2 + b_2 / D_{c2}^{1,9} + b_3 / H_{c2}^3 + b_4 \cdot R_{c2}$	0,424	0,651
От соседних деревьев ели			
Z_{c3}	$b_0 + b_1 / L_c + b_2 \cdot D_{c3} + b_3 / H_{c3} + b_4 / R_{c3}$	0,425	0,652
D_{c3}	$b_0 + b_1 \cdot L_c^2 + b_2 / D_{c3} + b_3 / H_{c3} + b_4 / R_{c3}$	0,822	0,907
H_{c3}	$b_0 + b_1 \cdot L_c^2 + b_2 / D_{c3}^3 + b_3 / H_{c3}^4 + b_4 / R_{c3}^5$	0,321	0,567
K_{c3}	$b_0 + b_1 \cdot L_c^2 + b_2 \cdot D_{c3}^{1,9} + b_3 \cdot H_{c3} + b_4 \cdot R_{c3}$	0,875	0,936

Примечание. b_i – свободные члены уравнения.

Таблица 3

Модели зависимости таксационных показателей центральных деревьев ели от параметров соседних деревьев

Показатель	Модель	Дисперсия D	Коэффициент детерминации R^2
От соседних деревьев ели			
Z_{e1}	$b_0 + b_1 \cdot L_e^2 + b_2 / D_{e1}^3 + b_3 \cdot H_{e1}^4 + b_4 \cdot R_{e1}^5$	0,469	0,685
D_{e1}	$b_0 + b_1 \cdot L_e^2 + b_2 / D_{e1}^3 + b_3 / H_{e1}^4 + b_4 / R_{e1}^5$	0,116	0,341
H_{e1}	$b_0 + b_1 \cdot L_e + b_2 \cdot D_{e1}^3 + b_3 \cdot H_{e1}^4 + b_4 \cdot R_{e1}^5$	0,190	0,436
K_{e1}	$b_0 + b_1 \cdot L_e^2 + b_2 / D_{e1}^{1,9} + b_3 / H_{e1}^4 + b_4 \cdot R_{e1}^4$	0,251	0,502
От соседних деревьев березы			
Z_{e2}	$b_0 + b_1 \cdot L_e^2 + b_2 / D_{e2}^3 + b_3 \cdot H_{e2}^4 + b_4 \cdot R_{e2}^5$	0,871	0,933
D_{e2}	$b_0 + b_1 \cdot L_e^2 + b_2 \cdot D_{e2}^3 + b_3 \cdot H_{e2}^4 + b_4 \cdot R_{e2}^5$	0,210	0,459
H_{e2}	$b_0 + b_1 \cdot L_e + b_2 \cdot D_{e2}^3 + b_3 \cdot H_{e2}^4 + b_4 \cdot R_{e2}^5$	0,334	0,578
K_{e2}	$b_0 + b_1 \cdot L_e^2 + b_2 \cdot D_{e2}^3 + b_3 \cdot H_{e2}^4 + b_4 \cdot R_{e2}^5$	0,217	0,466
От соседних деревьев сосны			
Z_{e3}	$b_0 + b_1 \cdot L_e + b_2 \cdot D_{e3}^3 + b_3 \cdot H_{e3}^4 + b_4 \cdot R_{e3}^5$	0,391	0,625
D_{e3}	$b_0 + b_1 \cdot L_e^2 + b_2 / D_{e3}^3 + b_3 / H_{e3} + b_4 / R_{e3}$	0,886	0,941
H_{e3}	$b_0 + b_1 \cdot L_e + b_2 \cdot D_{e3}^3 + b_3 \cdot H_{e3}^4 + b_4 / R_{e3}^5$	0,136	0,369
K_{e3}	$b_0 + b_1 \cdot L_e^2 + b_2 / D_{e3}^{1,9} + b_3 / H_{e3}^4 + b_4 / R_{e3}^5$	0,847	0,921

Основываясь на полученных результатах, можно сделать вывод, что конкуренция между елями не высокая. Уравнения зависимости таксационных показателей центральных деревьев ели от деревьев-соседей имеют невысокие коэффициенты детерминации (самый большой наблюдается для уравнения связи радиального прироста с таксационными показателями соседних елей: $R^2 = 0,685$). Аналогично можно оценить и зависимость центральных елей от соседних берез. Только для уравнения связи радиального прироста центральных елей с таксационными показателями соседних берез наблюдается высокое значение коэффициента детерминации: $R^2 = 0,933$.

Влияние соседних сосен на центральные деревья ели значительно больше. Наблюдается четкая корреляция значений диаметров и радиусов крон ели с показателями сосен ($R^2 = 0,941$ и $R^2 = 0,921$ соответственно), зависимость радиального прироста также прослеживается.

Анализ влияния пространственной структуры в сложном древостое на исследуемые деревья показал, что в уравнениях связи прослеживается наибольшая и стабильная зависимость диаметров стволов и радиусов крон от таксационных показателей и расстояний до соседних деревьев между такими породами, как сосна (находящаяся в 1-м ярусе) и ель (2-й ярус).

Влияние проведенных рубок на таксационные показатели растущих деревьев ели определялось двумя способами. Первый способ – обработка данных с резким (в 2 и более раз) изменением радиального прироста в соседние годы, при этом рассчитывалось, на сколько процентов изменился прирост по диаметру и объему

после рубки у деревьев, находящихся непосредственно рядом с пнями. Второй способ – проводилось исследование среднепериодического прироста в программе Statistica 13. Для этого использовались данные тех деревьев на постоянной пробной площади, которые пусть и косвенно, но подвергались влиянию рубки.

В соответствии с первым методом для детального исследования радиального прироста стволов, находящихся около пней, приростным буром брались керны (рис. 2).



Рис. 2. Измерение ширины годичных слоев

Обработка кернов проводилась в программе QGIS с увеличением и масштабированием для избегания ошибок. Измерялся каждый слой начиная с крайнего от коры для деревьев сосны (рис. 3) и ели (рис. 4).

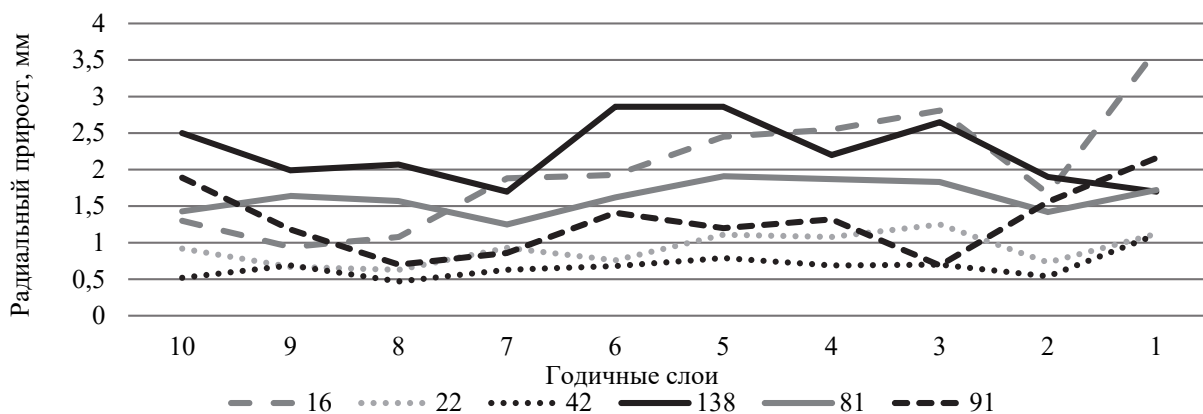


Рис. 3. Изменение годичного радиального прироста деревьев сосны

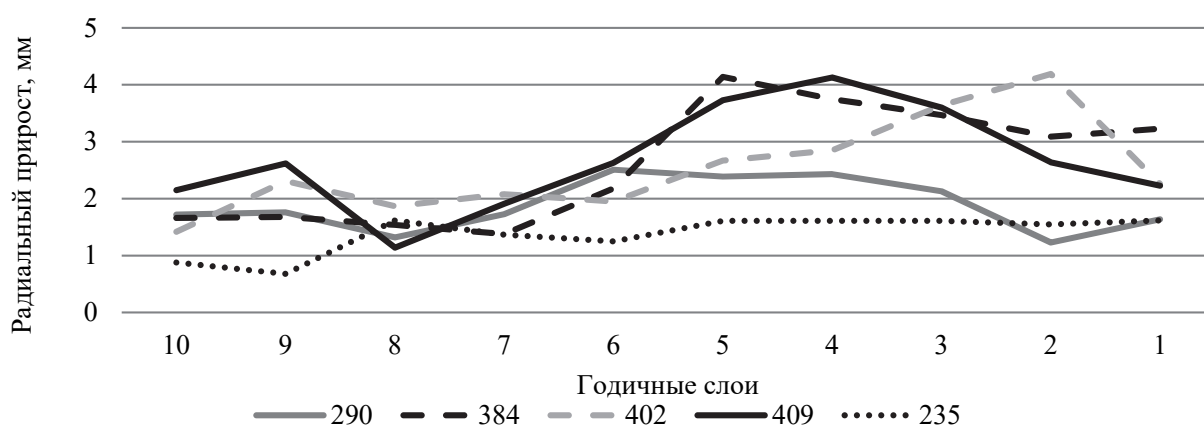


Рис. 4. Изменение годичного радиального прироста деревьев ели

Далее определялись средние значения ширины слоев до и после рубки для деревьев сосны и ели. Рассчитывался средний периодический радиальный прирост каждого дерева до рубки и после. Впоследствии вычислялся процент увеличения радиального прироста.

В результате исследования выявлено увеличение радиального прироста исследуемых стволов от 16 до 53% у ели и от 15 до 50% у сосны (табл. 4).

Вычисление процента прироста по объему исследуемых стволов проводилось по методу Шнейдера на основании ширины годичного слоя и диаметра на высоте 1,3 м. С учетом процента прироста определялся абсолютный прирост по объему исследуемых стволов.

Вычисления показали, что прирост по объему после рубки для деревьев ели увеличился от 15 до 45%, т. е. влияние проведенной рубки значительное.

Таблица 4

Изменение среднепериодического радиального прироста исследуемых стволов

Показатель	Среднепериодический радиальный прирост				
	Номера деревьев ели				
	290	384	402	409	235
До рубки, мм	1,63	1,56	1,95	1,69	1,17
После рубки, мм	1,93	3,31	2,73	3,16	1,62
Увеличение прироста, %	16	53	29	47	28

Окончание табл. 4

Показатель	Среднепериодический радиальный прирост					
	Номера деревьев сосны					
	16	22	42	138	81	91
До рубки, мм	1,25	0,79	0,58	1,81	1,47	1,16
После рубки, мм	2,51	1,01	0,75	2,36	1,73	1,39
Увеличение прироста, %	50	22	23	23	15	17

Таблица 5

Данные увеличения прироста по объему

Номер дерева	Прирост по объему				Увеличение прироста по объему, %
	до рубки, м ³	до рубки, %	после рубки, м ³	после рубки, %	
Для деревьев сосны					
16	0,10	29,33	0,22	64,09	34,77
22	0,10	11,98	0,14	16,14	4,16
42	0,09	8,50	0,13	11,15	2,65
138	0,29	46,08	0,31	51,43	5,35
81	0,28	22,93	0,30	24,61	1,68
91	0,14	29,41	0,14	30,75	1,35
Для деревьев ели					
290	0,09	54,89	0,12	68,90	14,02
384	0,09	50,27	0,17	93,77	43,50
402	0,09	80,43	0,13	113,51	33,08
409	0,07	88,48	0,11	133,91	45,43
235	0,05	40,89	0,05	58,52	17,63

Для сосны увеличение прироста по объему ощутимо варьирует от 1 до 35%, что, вероятно, связано с большим возрастом деревьев, их диаметром и различными расстояниями от пней (табл. 5).

Можно сделать вывод, что рубка соседних деревьев позволяет заметно увеличить прирост остающейся части древостоя (до 50% радиального прироста и 45% по объему). Однако детальное исследование показало, что прирост деревьев ели начинается через год после рубки, увеличиваясь почти в 2 раза и затем постепенно понижаясь до предыдущего уровня в течение последующих пяти лет.

Для оптимизации процесса лесовыращивания и достижения максимальных показателей радиального прироста и прироста по объему следует учитывать влияние пространственной структуры при проектировании мероприятий по возобновлению древостоев. Также пространственную структуру нужно учитывать при проведении рубок ухода в смешанных насаждениях для снижения отрицательного влияния конкуренции между различными породами и улучшения состава.

Заключение. Исследование показало: 1) существует достаточно видимый эффект при изменении пространственной структуры древостоя в результате рубок ухода; 2) эффект от рубок для ели прекращается через 5–6 лет после рубки;

3) наблюдаются достаточно выраженные зависимости между деревьями, находящимися в кругах конкуренции, что особо важно при межвидовом влиянии.

Результаты обработки экспериментальных данных показали, что изменение пространственной структуры после проведения рубок ухода позволяет увеличить радиальный прирост до 50%, а следовательно, и прирост по объему растущих стволов на 45%. Полученные цифры позволяют оценить уровень значимости и эффективности проводимых рубок ухода и, как следствие, оптимизировать в дальнейшем планирование рубок ухода для максимизации прироста древостоев.

Основываясь на результатах исследований, можно рекомендовать обновление и уточнение нормативов рубок ухода, обосновать оптимальную повторяемость и интенсивность, а также порядок отбора деревьев в рубку.

Создание оптимальной пространственной структуры древостоев при проведении рубок ухода даст возможность оптимизировать отбор деревьев в рубку, что, в свою очередь, будет способствовать улучшению качества растущих деревьев и увеличению количества получаемых сортиментов, а также позволит формировать максимально продуктивные насаждения в более короткие сроки.

Список литературы

1. Вайс А. А. Научные основы оценки горизонтальной структуры древостоев для повышения их устойчивости и продуктивности: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.03.02. Красноярск, 2014. 25 с.
2. Усольцев В. А., Семьшев М. М. Продукционные характеристики с учетом конкуренции деревьев в искусственных и естественных сосняках: сравнительный анализ. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 137 с.
3. Сеннов С. Н. Итоги экспериментального изучения конкуренции в древостоях // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 1993. № 11. С. 160–172.
4. 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.

5. Севко О. А., Пупенко А. В. Влияние пространственной структуры сосново-березовых древостоев на таксационные показатели деревьев сосны // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2017. № 3. С. 37–42.
6. Севко О. А. Оценка зависимости текущего прироста сосновой части смешанных сосновоберезовых древостоев от их пространственной структуры // Труды БГТУ. 2015. № 1: Лесное хоз-во. С. 41–45.
7. Коцан В. В. Классификация деревьев на основании пространственной структуры при назначении в рубки ухода // Труды БГТУ. 2015. № 1: Лесное хоз-во. С. 24–27.
8. Грибанов В. Я. Пространственная структура сосновых и лиственных деревьев // Продуктивность лесных фитоценозов. Красноярск, 1984. С. 42–47.
9. Мирошников В. С. Сосново-березовые насаждения БССР, их строение, лесоводственное и хозяйственное значение: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.02. Минск, 1955. 21 с.
10. Романов В. С. Изучение сосново-березовых культур в лесах БССР: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.02. Минск, 1956. 18 с.
11. Попов В. К. Сосново-березовые культуры Центральной лесостепи. Воронеж: Квадрат, 1997. 224 с.
12. Севко О. А., Пупенко А. В. Сравнительный анализ показателей чистых и смешанных сосновых насаждений в условиях массового усыхания в подзоне широколиственно-сосновых лесов Беларуси // Лесное хозяйство: тез. докл. 82-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 1–14 февр. 2019 г. Минск, 2019. С. 18.
13. Рахтеенко И. Н., Мартинович Б. С., Крот Л. А. Взаимоотношения древесных пород в чистых и смешанных насаждениях // Эколого-физиологические основы взаимодействия растений в фитоценозах. Минск: Наука и техника, 1976. 116 с.
14. Неволин О. А., Еремина О. О. Подрост и его значение в формировании высокопродуктивных сосновых лесов Европейского Севера России // Лесной журнал. 1998. № 4. С. 12–18.
15. Лабоха К. В., Шиман Д. В. Особенности естественного возобновления под пологом приспевающих и спелых еловых насаждений на почвах недостаточного и умеренного увлажнения // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2010. Вып. XVIII. С. 72–75.
16. Коновалов В. Н., Зарубина Л. В. Оценка жизнеспособности ели в березняке черничном в процессе его возрастного развития // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2016. № 5 (353). С. 44–60.
17. Зарубина Л. В. Рост подпологового возобновления ели на вырубках березняка черничного // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2016. № 216. С. 58–68.

References

1. Vays A. A. *Nauchnyye osnovy otsenki gorizontol'noy stryktury drevostoyev dlya povysheniya ikh ustoychivosti i produktivnosti. Avtoreferat dissertatsii doktora sel'skohozyaystvennykh nauk* [Scientific basis for assessing the horizontal structure of forest stands for increasing their stability and productivity. Abstract of thesis DSc (Agriculture Science)]. Krasnoyarsk, 2014. 25 p. (In Russian).
2. Usoltsev V. A., Semyshev M. M. *Produksionnyye kharakteristiki s uchetom konkurentsii derev'yev 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, UrO RAN Publ., 2007. 137 p. (In Russian).
3. Senov S. N. Results of an experimental study of competition in stands. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [News of the St.-Petersburg Forestry Engineering Academy], 1993, no. 11, pp. 160–172 (In Russian).
4. 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).
5. Sevko O. A., Pupenko A. V. Influence of the spatial structure of pine-birch forest stands on taxation indicators of pine trees. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2023, no. 2, pp. 37–42 (In Russian).
6. 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).
7. 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).
8. Griбанov V. Ya. The spatial structure of pine and deciduous trees. *Produktivnost' lesnykh fitotsenozov* [Productivity of forest phytocenoses]. Krasnoyarsk, 1984, pp. 42–47 (In Russian).

9. Miroshnikov V. S. *Sosnovo-berezovyye nasazhdeniya BSSR, ikh stroyeniye, lesovodstvennoye i khozyaystvennoye znacheniyе: avtoreferat dissertatsii kandidata sel'skokozyaystvennykh nauk* [Pine-birch plantations of the BSSR, their structure, silvicultural and economic significance. Abstract of thesis PhD (Agriculture)]. Minsk, 1955. 21 с. (In Russian).

10. Romanov V. S. *Izucheniye sosnovo-berezovykh kul'tur v lesakh BSSR: avtoreferat dissertatsii kandidata sel'skokozyaystvennykh nauk* [The study of pine-birch crops in the forests of the BSSR. Abstract of thesis PhD (Agriculture)]. Minsk, 1956. 18 p. (In Russian).

11. Popov V. K. Pine-birch cultures of the Central forest-steppe. *Sosnovo-berezovyye kul'tury Tsentral'noy lesostepi*. Voronezh, Kvadrat Publ., 1997. 224 p. (In Russian).

12. Sevko O. A., Pupenko A. V. Comparative analysis of indicators of pure and mixed pine plantations in conditions of mass drying in the subzone of broad-leaved pine forests of Belarus. *Lesnoye khozyaystvo: tezisy dokladov 82-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Forestry: abstracts of the 82th scientific and technical conference of faculty, researchers and graduate students]. Minsk, 2019, p. 18 (In Russian).

13. Rakhtenko I. N., Martinovich B. S., Krot L. A. The relationship of tree species in clean and mixed stands. *Ekologo-fiziologicheskiye osnovy vzaimodeystviya rasteniy v fitotsenozakh* [Ecological and physiological basis for the interaction of plants in phytocenoses]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1976. 116 p. (In Russian).

14. Nevolin O. A., Eremina O. O. Undergrowth and its importance in the formation of highly productive pine forests in the European North of Russia. *Lesnoy zhurnal* [Forest journal], 1998, no. 4, pp. 12–18 (In Russian).

15. Labokha K. V., Shiman D. V. Features of natural regeneration under the canopy of ripening and ripe spruce plantations on soils of insufficient and moderate moisture. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series I, Forestry, 2010, issue XVIII, pp. 72–75 (In Russian).

16. Kononov V. N., Zarubina L. V. Evaluation of the viability of spruce in a blueberry birch forest in the process of its age development. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal* [News of Higher Educational Institutions. Forest Journal], 2016, no. 5 (353), pp. 44–60 (In Russian).

17. Zarubina L. V. Growth of under-log renewal of spruce in felling areas of blueberry birch forest. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [News of the S.-Petersburg Forestry Engineering Academy], 2016, no. 216, pp. 58–68 (In Russian).

Информация об авторе

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

Мусский Алексей Анатольевич – инженер-таксатор. РУП «Белгослес» (220089, г. Минск, ул. Железнодорожная, 27/1, Республика Беларусь). E-mail: fray5920@gmail.com

Information about the author

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

Muskiy Aleksei Anatolevich – engineer-taxman. Republican Unitary Enterprise “Belgosles” (27/1, Zeleznodorozhnaya str., 220089, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fray5920@gmail.com

Поступила 15.03.2023

ЛЕСНАЯ ЭКОЛОГИЯ И ЛЕСОВОДСТВО

FOREST ECOLOGY AND SILVICULTURE

УДК 630*161.32:630*907.3

И. Ф. Ерошкина

Белорусский государственный технологический университет

ДИНАМИКА ТИПОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СОСНОВОЙ ФОРМАЦИИ

В статье рассматривается динамика типологической структуры и анализ динамики лесоводственно-таксационных показателей сосновой формации Беларуси за 1978–2021 г.

Установлено, что за исследуемый период площадь сосновой формации увеличилась на 20% (+674,5 тыс. га), общий запас насаждений возрос в 3 раза (+650,8 тыс. м³), средний запас – в 2,3 раза (+142,4 м³/га). Обобщенный анализ типологической структуры показывает, что наиболее распространенным типом леса на исходный и текущий периоды является сосняк мшистый – 42,3 и 36,4% соответственно. Значительно сократилась доля сосняков вересковых (с 19,5 до 3,6%) и существенно увеличилась доля сосняка орлякового (с 4,1 до 23,6%). Более чем в 4,5 раза сократилась площадь сосняков лишайниковых и в 11 раз сосняков брусничных.

Рассматриваются результаты формирования низкоплотных сосняков в возрасте до 30 лет с долей участия сосны в составе древостоя не более пяти единиц в разрезе типов леса. В наибольшей степени эти насаждения сформированы в мшистой, орляковой и черничной сериях.

Ключевые слова: сосновая формация, тип леса, типологическая структура, сосновые молодняки, сукцессия.

Для цитирования: Ерошкина И. Ф. Динамика типологической структуры сосновой формации // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 14–21. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-2.

I. F. Eroshkina

Belarusian State Technological University

DYNAMICS OF THE TYPOLOGICAL STRUCTURE OF THE PINE FORMATION

The article discusses the dynamics of the typological structure and the analysis of the dynamics of the forestry-growing-taxation indicators of the pine formation of Belarus for the period 1978–2021.

It was found that during the study period, the area of the pine formation increased by 20% (+674.5 thousand hectares), the total stock of plantations increased by 3 times (+650.8 thousand m³) and the average stock by 2.3 times (+142.4 m³/ha). A generalized analysis of the typological structure shows that the most common type of forest for the initial and current period is the mossy pine forest – 42.3 and 36.4%, respectively. The proportion of heather pine forests has significantly decreased (from 19.5 to 3.6%) and the proportion of bracken pine forests has significantly increased (from 4.1 to 23.6%). The area of lichen pine forests decreased by more than 4.5 times and the area of lingonberry pine forests decreased by 11 times.

The results of the formation of low-density pine forests under the age of 30 years and the share of pine in the forest stand of no more than five units in the context of forest types are considered. It has been established that these plantations are formed to the greatest extent in the mossy, bracken and blueberry series, which repeats the trend of the typological structure of pine forests.

Keywords: pine formation, forest type, typological structure, young pine trees, succession.

For citation: Eroshkina I. F. Dynamics of the typological structure of the pine formation. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 14–21. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-2 (In Russian).

Введение. Одним из важных показателей качественного состояния лесов является их породный состав, который должен подходить региональному комплексу лесорастительных условий. Еще ранее, до появления учений о типах леса, было замечено, что рост и развитие лесов, а также и качество древесины зависят от почвенно-грунтовых условий. Уже в середине XIX ст. русские лесоводы начали выделять типы леса, которые различались по почвенно-грунтовым условиям. Элементы типологического подхода к лесу появились не только среди лесоводов, но и среди почвоведов и ботаников [1–3].

Важный этап в развитии лесной типологии связан с классиком лесоводства Г. Ф. Морозовым, который серьезно подошел к биогеоценотическому пониманию типа леса [4]. Большой вклад в развитие лесной типологии внес и академик В. Н. Сукачев [5]. Разработанная им биогеоценотическая концепция стала теоретической основой для белорусской лесной типологии.

Типология основных лесов Беларуси впервые была опубликована И. Д. Юркевичем в статье «Классификация типов леса» [6]. Леса сосновой формации были разделены на 6 групп. В пределах этих групп выделено 25 типов леса (лесных ассоциаций). В другой работе И. Д. Юркевич все многообразие типов леса объединил не в группы, а в 14 серий, которые соответствовали типам условий местопроизрастания независимо от состава древостоя [7]. В 1955 г. он несколько изменил свою предыдущую лесотипологическую классификацию и в итоге было выделено уже 9 групп сосновых лесов, объединяющих 31 тип [8]. В 1961 г. типология сосновых лесов была значительно уточнена и расширена. В лесотаксационном справочнике классификация сосновых лесов была представлена с выделением типов леса и важнейших ассоциаций [9]. Было описано 11 типов сосновых лесов: лишайниковый, вересковый, брусничный, мшистый, орляковый, кисличный, черничный, приручейно-травяной,

долгомошный, багульниковый и сфагновый, которые объединяли в себе 54 ассоциации. В 1969 г. И. Д. Юркевичем были изданы лесотипологические таблицы, которые постоянно совершенствовались, дополнялись и подвергались переизданию в 1972 и 1980 г. [10–12]. В этих публикациях основные леса подразделены на 13 типов и около 60 ассоциаций. Критерии выделения лесных ассоциаций всесторонне изучены В. С. Гельтманом [13]. Дополнительно были выделены 2 типа: сосняк осоковый и осоково-сфагновый. Детально проанализированы типологическая структура основных фитоценозов и закономерности их роста по типам леса в монографии Н. Ф. Ловчего «Экологический анализ структуры и продуктивности основных лесов Беларуси» [2]. Типологией основных лесов Беларуси также занимались В. И. Саутин и Н. М. Березенко [14]. На нынешнем этапе развития лесной типологии разрабатываются региональные кадастры типов леса, которые по мере накопления новых исследований дополняются [15, 16].

Основная часть. На территории Беларуси доминировали и доминируют хвойные леса. По рекомендациям белорусских ученых [17–19] оптимальное участие в лесном фонде насаждений с преобладанием хвойных пород должно составлять от 73,8 до 80,7% (в среднем 75,5%) от площади покрытых лесом земель. Существующая динамика доли хвойных лесов заметно ниже указанных рекомендаций [20, 21]: 69,0% (1978 г.) – 66,2% (1994 г.) – 58,0% (2021 г.). При том что Стратегические планы [22] предусматривали долю хвойных лесов 73,7% в 2015 г. и 71,4% на 2030 г.

Среди хвойных лесов преобладает сосновая формация, которая является ведущим лесообразователем для Беларуси. В последние сорок лет наблюдается сокращение доли насаждений сосны в составе покрытых лесом земель.

Изменение отдельных показателей сосновых лесов за период с 1978 по 2021 г. представлены в табл. 1.

Таблица 1

Лесоводственно-таксационные показатели сосновых лесов Республики Беларусь

Показатели		Единица измерения	Величина показателя	
			1978 г.	2021 г.
Площадь (покрытые лесом земли)		га	3 388 300	4 062 754
Общий запас насаждений		тыс. м ³	362 930	1 013 713
Средний возраст		годы	34	65
Средний бонитет		класс	II,3	I,5
Средняя полнота		ед.	0,70	0,73
Средний запас насаждений	всех возрастных групп	м ³ /га	107	249,4
	спелых и перестойных	м ³ /га	162	298,8
Изменение запаса	среднее	м ³ /га	3,1	4,0
	текущее	м ³ /га	4,0	2,8
Типологическое разнообразие		тип леса	13	13
Депонирование углерода [C] живой фитомассой		т	315 787 578	378 945 111

Анализ динамики лесоводственно-таксационных показателей сосновой формации и изменения в ее типологической структуре выполнен на основе государственных учетов лесного фонда Белорусской ССР и Республики Беларусь по состоянию на 1978 г. и 01.01.2021 г., а также государственного лесного кадастра Республики Беларусь [23]. Исходным периодом анализируемой динамики принят 1978 г. как период воспроизводства лесов восстановленного лесного хозяйства и расширения в то время искусственного лесовосстановления.

На основании данных таблицы видны положительные изменения: площадь сосновых лесов увеличилась на 674,454 тыс. га, т. е. на 20%. Общий запас сосновых насаждений составил 1013,7 млн. м³ (возрос в 3 раза). Средний запас увеличился на 142,4 м³/га и составил 249,4 м³/га. Прирост средних запасов спелых и перестойных насаждений возрос в 1,84 раза (+136,8 м³/га). Средний возраст увеличился до 65 лет. Увеличилась продуктивность древостоев – средний класс бонитета повысился с П,3 до I,5. Депонирование углерода живой фитомассой возросло на 63 157 533 т.

Несмотря на то что площадь сосновой формации за исследуемый период увеличилась, ее доля в составе покрытых лесом земель сократилась (48,7%) и значительно ниже рекомендаций ученых (60–62%) с учетом почвенно-типологических условий земель лесного фонда республики [22, 24, 25].

По своим биологическим особенностям сосна способна расти в самых разнообразных экологических и климатических условиях – от песчаных дюн до верховых болот [2]. Является малотребовательной породой к почве и степени увлажнения. Благодаря этому все типы почвенно-грунтовых условий, которые встречаются на лесных землях Беларуси, обеспечивают формирование коренных сосновых лесов.

По геоботаническим подзонам Беларуси распространение сосновых лесов изменяется от 41,6% в подзоне дубово-темнохвойных лесов до 57,8% в подзоне грабово-дубово-темнохвойных и до 56,1% в подзоне широколиственно-сосновых лесов [16]. По исследованиям Н. Ф. Ловчего [2], во всех подзонах, округах и районах Беларуси сосновые леса преобладают на бедных песчаных почвах недостаточного и неустойчивого увлажнения, занимают в разных подзонах 62–63% общей площади формации. Это монодоминантные сосновые леса, не имеющие существенных зональных различий в древостое, но характеризующиеся некоторыми различиями в подлеске.

Леса на относительно богатых супесчаных или подстилаемых мореной почвах нормального

и повышенного увлажнения встречаются реже. По Беларуси они занимают 18,8% площади сосновой формации. На севере республики они представлены субформацией елово-сосновых лесов, а на Полесье – широколиственно-сосновых.

Сосновые леса на заболоченных и болотных олиготрофных и мезотрофных почвах занимают около 9% площади формации.

Сегодня типологическое разнообразие сосновых лесов представлено 13 типами леса [26]:

1) сосняк лишайниковый (*Pinetum cladinosum*). Занимает небольшие участки на вершинах всхолмлений и дюн, покрывает слаборазвитые, дерново-подзолистые, сухие, беднопесчаные почвы;

2) сосняк вересковый (*Pinetum callunosum*). Расположен по рельефу ниже лишайникового (повышенные плато, верхние части пологих склонов). Почвы дерново-подзолистые, песчаные, несколько суховатые;

3) сосняк брусничный (*Pinetum vaccinosum*). Занимает повышенные или ровные местоположения, чаще примыкает к вересковому типу с незаметными переходами. Покрывает дерново-подзолистые, свежие, песчаные почвы;

4) сосняк мшистый (*Pinetum pleuroziosum*). Занимает слегка повышенные, ровные или волнистые местоположения. Покрывает дерново-подзолистые, песчаные (более гумусированные), иногда легкосупесчаные свежие почвы;

5) сосняк орляковый (*Pinetum pteridiosum*). Приурочен к повышенным местоположениям и верхним частям склонов, но с более богатыми дерново-подзолистыми супесчаными почвами, чем сосняк мшистый;

6) сосняк кисличный (*Pinetum oxalidosum*). По почвенно-грунтовым условиям, составу пород является самым богатым типом сосняков, который может быть как коренным, так и производным от дубовых и еловых лесов. Почвы свежие, дерново-подзолистые, легкосуглинистые, а также песчаные и супесчаные, подстилаемые суглинком;

7) сосняк черничный (*Pinetum myrtillosum*). Приурочен обычно к пониженным местоположениям с кочковатым нанорельефом. Преобладают дерново-подзолистые, оглеенные, гумусированно-песчаные, иногда супесчаные, влажные почвы;

8) сосняк приручейно-травяной (*Pinetum fontinale-herbosum*). Встречается среди ручьев и рек, иногда возле низинных болот. Почвы перегнойно-глеевые, торфянисто-глеевые, подстилаемые породами разного механического состава, очень сырые, проточные;

9) сосняк долгомошный (*Pinetum polytrichosum*). Встречается на понижениях возле болот с выраженным нанорельефом. Для него характерны

торфянисто-подзолисто-глеевые почвы, песчаные или супесчаные, сырые, среднепроточные;

10) сосняк багульниковый (*Pinetum ledosum*). Размещается на окраинах сфагновых болот, занимает торфяно-глеевые слабопроточные почвы верхового заболачивания;

11) сосняк осоковый (*Pinetum caricosum*). Формируется на низинных болотах с торфяно-болотными слабопроточными почвами;

12) сосняк осоково-сфагновый (*Pinetum caricoso-sphagnosum*). Характерен для типичных переходных болот, занимает торфяно-болотные почвы со слабопроточными и застойными водами.

13) сосняк сфагновый (*Pinetum sphagnosum*). Распространен на верховых болотах, торфяно-болотных почвах с сильно застойными водами.

Распределение сосновых лесов Республики Беларусь и их динамика по типам леса представлены в табл. 2. За анализируемый период произошли нижеописанные изменения в типологической структуре сосняков.

Самым распространенным типом леса в 1978 г. являлся сосняк мшистый и занимал 42,0% от сосновой формации. Затем следовал сосняк вересковый (19,5%) и сосняк черничный (12,8%). Малораспространенными типами леса были сосняки долгомошные (5,2%) и сосняки орляковые (4,1%). Остальные типы леса сосновой формации были распространены незначительно и находились в пределах 0,2–2,9% от площади сосновой формации.

В настоящее время наблюдается несколько иное соотношение типов леса сосновой формации. Наиболее представленным по-прежнему является сосняк мшистый – 36,4%, на втором месте сосняк орляковый – 23,6%, далее черничный – 16,4%, кисличный – 5,9%, долгомошный – 4,9%, осоково-сфагновый – 3,7%, вересковый – 3,6% и багульниковый – 2,9%. Остальные типы леса сосновых лесов находятся в пределах 0,2–0,4%.

Значительно сократилась доля сосняка верескового (с 19,5 до 3,6%). В 1978 г. они занимали 660 719 га, или 99,4%, вересковой группы типов леса всех пород. На момент 2021 г. этот тип леса существенно сокращается и занимает площадь 147 781 га. Также произошло сокращение сосняка лишайникового на 63 952 га (с 2,4 до 0,4%), брусничного на 89 332 га (с 2,9 до 0,2%), мшистого на 54 925 га (с 42,0 до 36,4%), сфагнового на 71 538 га (с 2,4 до 0,2%).

Существенно увеличилась доля сосняка орлякового с 4,1 до 23,6% (+821 105 га) и представленность сосняка кисличного с 2,0 до 5,9% (+170 444 га). Возросла площадь сосняка черничного с 12,8 до 16,4% (+231 610 га), осоково-сфагнового с 2,2 до 3,7%. В целом эти серии типов леса существенно прибавились по площади. Незначительные изменения наблюдались в сосняке долгомошном (–0,3 процентного пункта), багульниковом (+0,2 процентного пункта). Сосняки осоковый (1,6%) и приручейно-травяной (0,2%) остались на прежнем уровне.

Таблица 2

Распределение сосновых лесов Республики Беларусь по типам леса

Типы сосновых лесов	1978 г.			2021 г.			
	сосновые леса		Доля от группы типов леса всех формаций, %	сосновые леса		Доля от группы типов леса всех формаций, %	Группы типов леса всех формаций, га
	га	%		га	%		
Лишайниковый	81 319	2,4	100,0	17 367	0,4	99,6	17 430
Вересковый	660 719	19,5	99,4	147 781	3,6	95,4	154 949
Брусничный	98 260	2,9	81,7	8928	0,2	82,0	10 883
Мшистый	1 423 086	42,0	87,2	1 478 011	36,4	95,3	1 550 214
Орляковый	138 920	4,1	46,6	960 025	23,6	71,1	1 349 628
Кисличный	67 766	2,0	10,5	238 210	5,9	18,2	1 307 787
Черничный	433 702	12,8	56,1	665 312	16,4	53,9	1 234 089
Долгомошный	176 192	5,2	62,8	197 530	4,9	49,7	397 412
Багульниковый	91 484	2,7	99,8	118 445	2,9	100,0	118 445
Осоковый	54 213	1,6	16,3	63 478	1,6	13,9	458 235
Сфагновый	81 319	2,4	94,6	9781	0,2	99,1	9874
Осоково-сфагновый	74 543	2,2	81,3	150 408	3,7	86,5	173 810
Папоротниковый	–	–	–	2	0,0	–	691 254
Приручейно-травяной	6777	0,2	14,8	7478	0,2	15,5	48 279
Итого	3 388 300	100,0	–	4 062 754	100,0	–	7 522 289

Удельный вес сосновых лесов в соответствующих сериях типов леса всех формаций следующей. В составе сосновой формации преобладает мшистый тип леса (36,4%), который составляет 95,3% серии мшистых лесов всех формаций; за ним следует сосняк орляковый (23,6%), удельный вес которого в орляковой серии также очень высок (71,1%); далее – сосняк черничный (16,4%), доля участия которого во всей черничной серии также значительна (53,9%). Отдельные типы лесорастительных условий лесных земель практически полностью заняты сосновыми насаждениями: лишайниковый (99,6%), вересковый (95,4%), брусничный (82,0%), мшистый (95,3%), багульниковый (100,0%), сфагновый (99,1%) и осоково-сфагновый (86,1%). В остальных группах типов леса сосняки делят территорию с формациями других пород: кисличный (18,2%), долгомошный (49,7%), осоковый (13,9%), приручейно-травяной (15,5%).

В лесном фонде республики отмечается смена сосновой формации повислоберезовой и другими мелколиственными породами. Особенно это заметно после перевода хвойных молодняков в покрытые лесом земли. Основной причиной смены сосны мелколиственными породами, как правило березой, является недостаточный охват или неэффективные методы ухода за сосновыми молодняками. Сосна в этом возрасте отличается относительно медленной скоростью роста в высоту.

По материалам повыделного банка данных Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь на 1 января 2021 г., сосновые древостои в возрасте порядка 10 лет, т. е. спустя не более 3–5 лет после перевода в покрытые лесом земли, в значительных объемах являются низкополотными (3,1% их площади с полнотами 0,3–

0,4 и 28,2% – с полнотами 0,5–0,6). Древостои с недостаточной долей сосны в составе занимают также значительные объемы: с участием сосны 3–4 единицы в составе – 11,3% и 5–6 единиц – 21,3% площади 10-летних сосновых насаждений.

Сокращение доли хвойных пород в пользу мелколиственных в среднем составляет до 58,5% через 10 лет после перевода и до ~30,9% через 30 лет после перевода [24].

По результатам исследований в лесном фонде республики на площади 11 504,4 га выявлены сформированные низкополотные (полнотой 0,4–0,5) сосняки в возрасте до 30 лет и долей участия сосны в составе древостоя не более пяти единиц. Эти ненормативные насаждения, в соответствии с Правилами рубок леса в Республике Беларусь, не планируются к проведению осветлений, прочисток и прореживаний, так как не соответствуют критериям проведения рубок ухода и являются первоочередными объектами для перехода в формацию мелколиственных лесов [27].

В табл. 3 представлено распределение площади низкополотных (0,4–0,5) сосновых молодняков в возрасте 5–30 лет и долей участия сосны в составе древостоя не более пяти единиц по типам леса.

Из табл. 3 видно, что в наибольшей степени низкополотные сосновые молодняки сформированы в мшистой (2779,1 га), орляковой (2425,0 га), черничной (2362,9 га) сериях типов сосновых лесов, чуть менее в долгомошной (1129,0 га), кисличной (819,7 га), осоковой (720,1 га), вересковой (551,5 га), осоково-сфагновой (344,7 га), багульниковой (252,2 га) сериях типов сосновых лесов. В остальных типах леса указанные молодняки занимают площадь в пределах 17,8–69,3 га.

Таблица 3

Распределение площади по типам леса низкополотных (0,4–0,5) сосновых молодняков в возрасте 5–30 лет и долей участия сосны в составе древостоя не более пяти единиц

Тип леса	Площадь		Полнота		Доля ненормативных молодняков от площади типа леса, %
	га	%	0,4	0,5	
Сосняк лишайниковый	17,8	0,2	3,1	14,7	9,83
Сосняк вересковый	551,5	4,8	191,4	360,1	0,37
Сосняк брусничный	33,1	0,3	5,6	27,5	0,37
Сосняк мшистый	2779,1	24,1	467,0	2312,1	0,20
Сосняк орляковый	2425,0	21,1	539,8	1885,2	0,25
Сосняк кисличный	819,7	7,1	156,2	663,5	0,34
Сосняк черничный	2362,9	20,5	385,7	1977,2	0,36
Сосняк долгомошный	1129,0	9,8	341,6	787,4	0,57
Сосняк багульниковый	252,2	2,2	79,5	172,7	0,21
Сосняк осоковый	720,1	6,3	167,2	552,9	1,13
Сосняк осоково-сфагновый	344,7	3,0	296,6	48,1	0,23
Сосняк приручейно-травяной	69,3	0,6	20,4	48,9	0,93
Всего	11504,4	100,0	2654,1	8850,3	0,28

Доля участия ненормативных молодняков в пределах каждого типа леса составляет в основном 0,20–1,13%, за исключением сосняка лишайникового, где их доля составляет 9,83%.

Заключение. За исследуемый период заметны положительные изменения в увеличении площади сосновой формации, общего и среднего запаса; повысилась продуктивность сосняков.

Анализ типологической структуры показывает, что наиболее распространенным типом леса на исходный и текущий периоды является сосняк мшистый – 42,3 и 36,4% соответственно. Затем, в 1979 г. – сосняк вересковый (19,5%) и в 2021 г. – сосняк орляковый (23,6%). Значительное место занимает сосняк черничный 12,8 и 16,4% соответственно. Почти равные доли приходятся на сосняк долгомошный (5,2 и 4,9%), багульниковый (2,7 и 2,9%) и осоковый (1,6 и 1,6%). Площади каждого из остальных серий сосняков находятся в пределах 0,2–5,9%. За 40-

летний период значительно сократилась доля сосняков вересковых (с 19,5 до 3,6%) и существенно увеличилась доля сосняков орляковых (с 4,1 до 23,6%). Более чем в 4,5 раза сократилась площадь сосняков лишайниковых и в 11 раз – сосняков брусничных.

В лесном фонде республики выявлены низкополнотные (0,4–0,5) сосновые молодняки до 30 лет и с долей участия сосны в составе не более 5 единиц, которые являются потенциальными объектами для перехода в формации мягколиственных пород. В наибольшей степени эти «ненормативные» сосновые молодняки сформированы в мшистой (2779,1 га), орляковой (2425,0 га) и черничной (2362,9 га) сериях типов сосновых лесов.

Работа выполнена в рамках задания 5 отраслевой научно-технической программы «Леса будущего», 2021–2025 гг. (руководитель задания – доктор сельскохозяйственных наук, профессор Л. Н. Рожков).

Список литературы

1. Докучаев В. В. Наши степи прежде и теперь // Избр. соч.: в 3 т. М.: Сельхозгиз, 1949. Т. 2. С. 161–228.
2. Ловчий Н. Ф. Экологический анализ структуры и продуктивности сосновых лесов Беларуси. Минск: Беларус. навука, 1999. 263 с.
3. Высоцкий Г. Н. Лесоводственные очерки // Записки Белорус. ин-та сельск. и лесн. хоз-ва. 1924. Вып. 3. С. 11–40.
4. Морозов Г. В. Избранные труды: в 2 т. М.: Лесная пром-ть, 1971. Т. 2. 536 с.
5. Сукачев В. Н. Развитие лесной типологии в СССР за 40 лет // Достижения науки в лесном хозяйстве СССР за 40 лет. 1957. С. 5–16.
6. Юркевич И. Д. Классификация типов леса БССР // Сб. работ по лесн. хоз-ву БелНИИЛХ. 1940. Вып. 1. С. 43–61.
7. Юркевич И. Д. Объединение типов леса БССР в серии // Записки Белорус. лесотехн. ин-та. 1940. Вып. 5. С. 62–68.
8. Юркевич И. Д. О лесной типологии БССР // Леса БССР и пути повышения их производительности. 1955. С. 44–50.
9. Юркевич И. Д. Типы леса и лесные ассоциации // Лесотаксационный справочник. 1962. С. 196–201.
10. Юркевич И. Д. Лесотипологические таблицы. Минск: Наука и техника, 1969. 52 с.
11. Юркевич И. Д. Выделение типов леса при лесоустроительных работах. Минск: Наука и техника, 1972. 72 с.
12. Юркевич И. Д. Выделение типов леса при лесоустроительных работах. 3-е изд., доп. Минск: Наука и техника, 1980. 120 с.
13. Гельтман В. С. Географический и типологический анализ лесной растительности Белоруссии. Минск: Наука и техника, 1982. 328 с.
14. Саутин В. И., Березенко Н. М. Типы леса // Леса Белоруссии. 1969. С. 57–60.
15. Ловчий Н. Ф., Пучило А. В., Гуцевич В. Д. Кадастр типов сосновых лесов Белорусского Полесья. Минск: Беларус. навука, 2009. 194 с.
16. Ловчий Н. Ф. Кадастр типов сосновых лесов Белорусского Полесья. Минск: Беларус. навука, 2012. 221 с.
17. Рожков Л. Н., Ермаков В. Е., Ловчий Н. Ф. Динамика и состояние сосновых лесов Беларуси // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2005. Вып. VIII. С. 7–13.
18. Рожков Л. Н. Проблемы воспроизводства сосны в Беларуси // Лесное и охотничье хозяйство. 2003. № 2. С. 6–7.
19. Рожков Л. Н., Ерошкина И. Ф. Воспроизводство сосновой формации Беларуси в свете сохранения микропопуляционного разнообразия на уровне эдафоклиматипов // Сб. науч. тр. Ин-та леса Нац. акад. наук Беларуси. Гомель, 2015. Вып. 75: Проблемы лесоведения и лесоводства. С. 126–138.

20. Шатравко В. Г. Современное состояние и перспективы развития лесного хозяйства Республики Беларусь // Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию ИЛ НАН Беларуси, Гомель, 13–15 нояб. 2020 г. Гомель, 2020. С. 7–11.

21. Рожков Л. Н., Ерошкина И. Ф., Шатравко В. Г. Динамика формации сосновых лесов (*Pineta silvestriae*) Республики Беларусь // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2022. № 2. С. 37–48. DOI: <https://doi.org/10.52065/2519-402X-2022-258-2-37-48>.

22. Стратегический план развития лесохозяйственной отрасли на период с 2015 по 2030 годы: утв. Зам. Премьер-министра Респ. Беларусь М. И. Русым 23.12.2014 г. Минск, 2015. 20 с.

23. Государственный лесной кадастр Республики Беларусь на 01.01.2021. Минск: Белгослес, 2021. 94 с.

24. Шатравко В. Г., Рожков Л. Н. Особенности воспроизводства и выращивания сосновой формации Беларуси // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (246). С. 58–65.

25. Рожков Л. Н., Ерошкина И. Ф. Влияние длительного хозяйственного воздействия на изменение лесного фонда // Сб. науч. тр. Ин-та леса Нац. акад. наук Беларуси. Гомель, 2011. Вып. 71: Проблемы лесоведения и лесоводства. С. 132–145.

26. Юркевич И. Д., Голод Д. С., Адериго В. С. Растительность Белоруссии, ее картографирование, охрана и использование. Минск: Наука и техника, 1979. 248 с.

27. Об утверждении правил рубок леса в Республике Беларусь: утв. постановлением М-ва лесного хоз-ва Респ. Беларусь от 19 дек. 2016 г. № 68. Минск: Минлесхоз, 2016. 18 с.

References

1. Dokuchaev V. V. Our steppes before and now. *Izbrannyye sochineniya: v 3 tomakh* [Selected writings; in 3 vol.] Moscow, Sel'khozgiz Publ., 1949, vol. 2, pp. 161–228 (In Russian).

2. Lovchij N. F. *Ekologicheskij analiz struktury i produktivnosti sosnovykh lesov Belarusi* [Ecological analysis of the structure and productivity of pine forests in Belarus]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 1999. 263 p. (In Russian).

3. Vysockiy G. N. Forestry essays. *Zapiski Belorusskogo instituta sel'skogo i lesnogo khozyaystva* [Notes of the Belarusian Institute of Agriculture and Forestry], 1924, issue 3, pp. 11–40 (In Russian).

4. Morozov G. V. *Izbrannyye trudy: v 2 tomakh* [Selected works: in 2 vol.]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1971. Vol. 2. 536 p. (In Russian).

5. Sukachev V. N. Development of forest typology in the USSR for 40 years. *Dostizheniya nauki v lesnom khozyaystve SSSR za 40 let* [Achievements of science in forestry for 40 years], 1957, pp. 5–16 (In Russian).

6. Yurkevich I. D. Classification of forest types of the BSSR. *Sbornik rabot po lesnomu khozyaystvu BelNIILH* [Collection of works on forestry of the BelNIILKH], 1940, issue 1, pp. 43–61 (In Russian).

7. Yurkevich I. D. Combination of forest types of the BSSR in series. *Zapiski Belorusskogo lesotekhnicheskogo instituta* [Notes of the Belarusian Forestry Institute], 1940, issue 5, pp. 62–68 (In Russian).

8. Yurkevich I. D. On the forest typology of the BSSR. *Lesnaya BSSR i puti povysheniya ikh proizvoditel'nosti* [Forests of the BSSR and ways to improve their productivity], 1955, pp. 44–50 (In Russian).

9. Yurkevich I. D. Forest types and forest associations. *Lesotaksatsionnyy spravochnik* [Forest inventory guide], 1962, pp. 196–201 (In Russian).

10. Yurkevich I. D. *Lesotipologicheskiye tablitsy* [Forest typological tables]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1969. 52 p. (In Russian).

11. Yurkevich I. D. *Vydeleniye tipov lesa pri lesoustroitel'nykh rabotakh* [Identification of forest types during forest management work]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1972. 72 p. (In Russian).

12. Yurkevich I. D. *Vydeleniye tipov lesa pri lesoustroitel'nykh rabotakh* [Identification of forest types during forest management work], Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1980. 120 p. (In Russian).

13. Gel'tman V. S. *Geograficheskij i tipologicheskij analiz lesnoy rastitel'nosti Belorussii* [Geographical and typological analysis of forest vegetation in Belarus]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1982. 328 p. (In Russian).

14. Sautin V. I., Berezenko N. M. Forest types. *Lesnaya Belorussii* [Forests of Belarus], 1969, pp. 57–60 (In Russian).

15. Lovchij N. F., Puchilo A. V., Gutsevich V. D. *Kadastr tipov sosnovykh lesov Belorusskogo Poozer'ya* [Cadastre of types of pine forests of the Belarusian Lakeland], Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2009. 194 p. (In Russian).

16. Lovchij N. F. *Kadastr tipov sosnovykh lesov Belorusskogo Poles'ya* [Cadastre of types of pine forests of Belarusian Polissya], Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2012. 221 p. (In Russian).

17. Rozhkov L. N., Ermakov V. E., Lovchiy N. F. Dynamics and state of pine forests of Belarus. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series I, Forestry, 2005, issue VIII, pp. 7–13 (In Russian).

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

19. Rozhkov L. N., Eroshkina I. F. Reproduction of the pine formation of Belarus in the light of the preservation of micropopulation diversity at the level of edaphoclimat types. *Sbornik nauchnykh trudov Instituta lesa Natsional'noy akademii nauk Belarusi* [Collections of Scientific papers of the Forest Institute of the National Academy of sciences of Belarus], Gomel, 2015, issue 75: Problems of silvicultures and Forest Management, pp. 126–138 (In Russian).

20. Shatravko V. G. Current state and prospects of development of forestry of the Republic of Belarus. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 90-letiyu Instituta lesa Natsional'noy akademii nauk Belarusi* [Proceedings of the International scientific-practical Conference dedicated to the 90th anniversary of the Forest Institute of the National Academy of sciences of Belarus]. Gomel, 2020, pp. 7–11 (In Russian).

21. Rozhkov L. N., Eroshkina I. F., Shatravko V. G. Dynamics of formation of pine forests (*Pineta silvestriae*) of the Republic of Belarus. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2022, no. 2, pp. 37–48. DOI: 10.52065/2519-402X-2022-258-2-37-48 (In Russian).

22. Strategic plan for the development of the forestry industry for the period from 2015 to 2030. Minsk, 2015. 20 p. (In Russian).

23. State Forest Cadastre of the Republic of Belarus of 01.01.2021. Minsk, Belgosles Publ., 2021. 94 p. (In Russian).

24. Shatravko V. G., Rozhkov L. N. Peculiarities of reproduction and cultivation of the pine formation of Belarus. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2021, no. 2, pp. 58–65 (In Russian).

25. Rozhkov L. N., Eroshkina I. F. Influence of long-term economic impact on the change in the forest fund. *Sbornik nauchnykh trudov Instituta lesa Natsional'noy akademii nauk Belarusi* [Collections of Scientific papers of the Forest Institute of the National Academy of sciences of Belarus], Gomel, 2011, issue 71: Problems of silvicultures and Forest Management, pp. 132–145 (In Russian).

26. Yurkevich I. D., Golod D. S., Aderiho V. S. *Rastitel'nost' Belorussii, eyo kartografirovaniye, okhrana i ispol'zovaniye* [Vegetation of Belarus, its mapping, protection and use]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1979. 248 p. (In Russian).

27. On the approval rules for logging in the Republic of Belarus: Resolution of the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus, December 19, 2016, no. 68. Minsk, Minleskhoz, 2016. 18 p. (In Russian).

Информация об авторе

Ерошкина Ирина Федоровна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: e_ira@belstu.by

Information about the author

Yeroshkina Irina Fedorovna – PhD (Agriculture), Assistant Professor, the Department of Silviculture. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: e_ira@belstu.by

Поступила 15.03.2023

УДК 632.15

Л. Н. Москальчук

Белорусский государственный технологический университет

**АНАЛИЗ САНИТАРНОГО И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ СТАРОБИНСКОГО ЛЕСХОЗА**

В работе приведены результаты анализа санитарного и экологического состояния лесных экосистем Старобинского лесхоза Минского ГПЛХО за прошедший ревизионный период (2011–2020 гг.). Установлено, что за период 2012–2019 гг. в Старобинском лесхозе гибель лесных насаждений зафиксирована на площади 3151,3 га, при этом максимальный объем гибели отмечен в 2017 г. (1316,8 га). Площадь насаждений, утративших биологическую устойчивость (III класс), составляет 178,6 га, что является результатом влияния неблагоприятных климатических условий и дальнейшего повреждения хвойных насаждений стволовыми вредителями. Полученные данные свидетельствуют о значительном ухудшении санитарного и экологического состояния лесных насаждений данного лесхоза за анализируемый период (2011–2019 гг.). Учитывая сложившуюся ситуацию, необходимо проведение дальнейших научных исследований по установлению причин гибели лесных экосистем Старобинского лесхоза.

Ключевые слова: лесные экосистемы, усыхание лесов, промышленные выбросы и отходы, техногенное загрязнение, санитарное и экологическое состояние насаждений.

Для цитирования: Москальчук Л. Н. Анализ санитарного и экологического состояния лесных экосистем Старобинского лесхоза // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 22–27. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-3.

L. M. Maskalchuk

Belarusian State Technological University

**ANALYSIS OF THE SANITARY AND ECOLOGICAL STATE
OF THE FOREST ECOSYSTEMS OF THE STAROBINSKY FORESTRY**

The paper presents the results of the analysis of the sanitary and ecological state of forest ecosystems of the Starobinsky forestry of the Minsk State Forestry Facility for the past revision period (2011–2020). It is established that for the period of 2012–2019 on the territory of Starobinsky forestry enterprise there was a loss of forest plantations on an area of 3151.3 ha, and the maximum volume of forest plantation loss was noted in 2017 (1316.8 ha). In the forestry, the area of plantations that have lost their biological stability (III class) is 178.6 ha, which is the result of the influence of adverse climatic conditions and further damage to coniferous plantations by stem pests. The data obtained indicate a significant deterioration in the sanitary and ecological state of forest plantations of the Starobinsky forestry for the analyzed period (2011–2019). Given the current situation, it is necessary to carry out further scientific research to establish the causes of the death of forest ecosystems of the Starobinsky forestry enterprise.

Keywords: forest ecosystems, destruction up of forests, industrial emissions and wastes, technogenic pollution, sanitary and ecological state.

For citation: Maskalchuk L. M. Analysis of the sanitary and ecological state of the forest ecosystems of the Starobinsky forestry. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 22–27. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-3 (In Russian).

Введение. Основным направлением деятельности ОАО «Беларуськалий» является добыча и переработка сильвинитовой руды для получения хлористого калия и других продуктов различного назначения. Промышленные отходы от переработки сильвинитовой руды представлены двумя основными видами – твердыми галитовыми отходами, содержащими 92–95% хлористого калия, и глинисто-солевыми шламами, представленными суспензией частиц хлористого калия, хлористого натрия и нерастворимого (глинистого) осадка в

насыщенном растворе данных солей. Ежегодно при существующем объеме производства на ОАО «Беларуськалий» образуется 16–20 млн т галитовых отходов и 1,5–2,0 млн т глинисто-солевых шламов (ГСШ), для складирования которых отведено более 2,0 тыс. га плодородных сельскохозяйственных земель. В настоящее время общее количество промышленных отходов, складированных на территории Солигорского горно-промышленного района, составляет более 1 млрд т [1, 2].

Существенную роль в загрязнении объектов окружающей среды в Солигорском горно-промышленном районе играют также пылегазовые выбросы обогатительных фабрик. Основное количество данных выбросов образуется в процессе сушки и гранулирования концентрата калия, а также на ТЭС, которые имеются на 1–4 рудоуправлениях ОАО «Беларуськалий». Данные процессы сопровождаются значительными выбросами диоксида серы, диоксида азота, оксида углерода, хлористого калия и других загрязнителей, которые негативно воздействуют на атмосферу, почву, водные объекты, животный и растительный мир как вблизи расположения предприятий, так и на значительном расстоянии от их местонахождения [3].

Расположенные на поверхности земли промышленные отходы ОАО «Беларуськалий» и выбросы обогатительных фабрик, загрязняют объекты окружающей среды (воздух, водные бассейны, почвы), что отрицательным образом сказывается на состоянии растительного покрова и физико-химических свойствах почв и, следовательно, на состоянии лесных экосистем Старобинского лесхоза в целом. Лесные почвы Старобинского лесхоза и сельскохозяйственные почвы района подвержены химическому загрязнению рассолами солеотвалов и шламохранилищ, а также газовыми и пылевыми выбросами обогатительных фабрик. Так, согласно данным локального мониторинга [3], наиболее высокие значения концентраций хлорид-ионов (максимальная концентрация – 138 506 мг/дм³) и минерализации воды (до 224 010 мг/дм³) наблюдались в скважинах подземных вод вблизи солеотвалов и шламохранилищ четырех рудоуправлений ОАО «Беларуськалий». Следует отметить, что оценка качества подземных вод государственной сетью наблюдений проводится на основании СанПиН 10–124 РБ 99 [4], согласно которым предельно допустимая концентрация хлоридов составляет 350 мг/дм³, а уровень минерализации – 1000 мг/дм³.

Проблема усыхания сосновых насаждений в Республике Беларусь. В последние десятилетия в республике наблюдается массовое усыхание сосновых насаждений на значительной площади. Так, согласно данным Национальной системы мониторинга окружающей среды (отчет за 2021 г., с. 331) в республике за период 2012–2021 гг. произошло усыхание сосновых насаждений на площади 189,4 тыс. га [5].

На протяжении 2015–2021 гг. ежегодные площади погибших насаждений были значительно больше, чем в предыдущие годы [5]. За указанный период среднегодовая площадь погибших насаждений составила 28,1 тыс. га, что в 2,9 раза больше, а в 2018 г. – в 5,2 раза больше, чем среднее значение за предыдущие десять лет.

В ряде работ приведены исторические данные и особенности, а также причины и возможные последствия данной проблемы для дальнейшего ведения лесного хозяйства [6, 7]. Кроме того, имеются работы по анализу динамики усыхания сосновых насаждений на территории республики, обоснованы перспективные способы минимизации масштабов усыхания и лесовосстановления образовавшихся вырубок в условиях наблюдающихся климатических изменений [8].

Следует отметить, что современная структура и состояние лесов Беларуси зависит не только от климатических изменений [9], но и от проведения интенсивной хозяйственной деятельности [10]. Известно, что леса естественного происхождения в республике составляют лишь 30,74% [10], а остальная часть приходится на леса искусственного происхождения. В республике ежегодно создаются лесные культуры на площади более 40 тыс. га [11].

В этой связи проведение анализа экологического и санитарного состояния лесного фонда отдельных лесхозов республики, расположенных в различных геоботанических зонах и подзонах, представляет существенный научный и практический интерес.

Характеристика структуры лесного фонда. Краткая характеристика структуры лесного фонда ГЛХУ «Старобинский лесхоз» приведена в табл. 1 [12, 13], согласно которой общая площадь лесов данного лесхоза за анализируемый период увеличилась на 261,0 га (+0,3%) в результате передачи в состав лесного фонда сельскохозяйственных земель и уточнения контуров участков при формировании современной земельной информационной системы Солигорского района лесхоза. Сравнение динамики лесного фонда свидетельствует о том, что в результате проведения сплошных санитарных рубок в усыхающих насаждениях (на площади 2929 га за последние 3 года) по отдельным показателям произошли отрицательные изменения.

Площадь покрытых лесом земель уменьшилась на 1696,7 га (2,0%), в их составе площадь лесных культур сократилась на 896,7 га (5,6%). Не покрытые лесом земли по сравнению с данными лесоустройства 2010 г. увеличились на 123,4 га (5,2%). В их составе в результате проведения лесовосстановительных мероприятий площадь пустырей и прогалин уменьшилась на 900,3 га (65,3%), а площадь вырубки увеличилась на 934,6 га (96,9%).

Площадь нелесных земель увеличилась на 508,8 га (5,5%) за счет увеличения земель под болотами. Учтенные прошлым лесоустройством сельскохозяйственные земли на площади 542,0 га сократились до 7,2 га за счет перевода их в покрытые лесом и нелесные земли (болота).

Таблица 1

Распределение площади лесного фонда Старобинского лесхоза по видам земель

№ п/п	Наименование вида земель	Площадь по данным лесоустройства				Изменение (+/-)	
		на 01.01.2020		на 01.01.2011		га	%
		га	%	га	%		
1	Общая площадь земель лесного фонда, в т. ч.:	100 111,0	100,0	99 850,0	100,0	+261,0	+0,3
1.1	Лесные земли – всего, из них:	90 286,2	90,2	90 534,0	90,7	-247,8	-0,3
1.1.1	Покрытые лесом земли, в т. ч.:	84 801,0	84,7	86 497,7	86,6	-1696,7	-2,0
1.1.1.1	лесные культуры	14 996,1	15,0	15 892,8	16,9	-896,7	-5,6
1.1.1.2	несомкнувшиеся лесные культуры	2901,9	2,9	1577,8	1,6	+1324,1	+83,9
1.1.1.3	лесные питомники, плантации	102,1	0,1	100,7	0,1	+1,4	+1,4
1.1.2	Не покрытые лесом земли – всего, в т. ч.:	2481,2	2,5	2357,8	2,4	+123,4	+5,2
1.1.2.1	гари, погибшие насаждения	104,3	0,1	15,2	–	+89,1	+586,2
1.1.2.2	вырубки	1899,0	1,9	964,4	1,0	+934,6	+96,9
1.1.2.3	прогалины, пустыри	477,9	0,5	1378,2	1,4	-900,3	-65,3
1.2	Нелесные земли – всего, из них:	9824,8	9,8	9316,0	9,3	+508,8	+5,5
1.2.1	пахотные	4,4	–	15-6,4	0,2	-152,0	-97,2
1.2.2	земли под постоянными культурами	–	–	–	–	–	–
1.2.3	луговые земли	2,8	–	385,6	0,4	-382,8	-99,3
1.2.4	земли под болотами	7735,6	7,7	6541,4	6,6	+1194,2	+18,3
1.2.5	земли под водными объектами	532,1	0,5	669,1	0,7	-137,0	-20,5
1.2.6	земли под дорогами и иными транспортными коммуникациями	1296,3	1,3	1342,2	1,3	-45,9	-3,4
1.2.7	земли под застройкой	24,6	–	20,9	–	+3,7	+17,7
1.2.8	нарушенные земли	–	–	11,5	–	-11,5	-100,0
1.2.9	неиспользуемые земли	118,4	0,1	5,5	–	+112,9	+2052,7
1.2.10	иные земли	110,6	0,2	183,4	0,1	-72,8	-39,7

Данные о распределении лесных насаждений Старобинского лесхоза по классам биологической устойчивости приведены в табл. 2, из которой следует, что к III классу биологи-

ческой устойчивости (утратившие устойчивость) отнесены площади погибших насаждений – 98,9 га, а также площади ветровалов – 2,3 га и гарей – 3,1 га.

Таблица 2

Распределение лесных насаждений Старобинского лесхоза по классам биологической устойчивости

Преобладающая порода	Классы биологической устойчивости насаждений						Итого	
	I – биологически устойчивые		II – с нарушенной устойчивостью		III – утратившие устойчивость			
	площадь, га	%	площадь, га	%	площадь, га	%	площадь, га	%
Сосна	33 905,8	95,5	1476,2	4,2	113,6	0,3	35 495,6	100,0
Ель	1314,5	91,3	64,2	4,5	60,5	4,2	1439,2	100,0
Лиственница	23,0	100,0	–	–	–	–	23,0	100,0
Итого хвойных	35 243,3	95,4	1540,4	4,2	174,1	0,4	36 957,8	100,0
Дуб	4093,8	98,5	60,9	1,5	1,0	–	4155,7	100,0
Дуб красный	120,6	100,0	–	–	–	–	120,6	100,0
Граб	1058,6	99,8	2,1	0,2	–	–	1060,7	100,0
Ясень	229,6	100,0	–	–	–	–	229,6	100,0
Клен	236,9	99,7	–	–	0,6	0,3	237,5	100,0
Итого твердолиственных	5739,5	98,9	63,0	1,1	1,6	–	5804,1	100,0
Береза	24 022,6	99,8	37,5	0,2	2,9	–	24 063,0	100,0
Осина	960,2	99,7	3,2	0,3	–	–	963,4	100,0
Ольха черная	16 329,1	99,9	14,1	0,1	–	–	16 343,2	100,0
Липа	0,9	100,0	–	–	–	–	0,9	100,0
Ива древовидная	0,6	100,0	–	–	–	–	0,6	100,0
Итого мягколиственных	41 313,4	99,9	54,8	0,1	2,9	–	41 371,1	100,0
Итого основных пород	82 296,2	97,8	1658,2	2,0	178,6	0,2	84 133,0	100,0
Ивы кустарниковые	772,3	100,0	–	–	–	–	772,3	100,0
Всего	83 068,5	97,8	1658,2	2,0	178,6	0,2	84 905,3	100,0

Таблица 3

Динамика гибели насаждений Старобинского лесхоза за период 2012–2019 гг.

Причины	Площадь по годам, га								
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Итого
Пожары	–	1,0	1,0	3,0	2,0	–	–	–	7,0
Воздействие неблагоприятных погодных условий (усыхание)	–	–	21,4	24,1	95,3	1305,9	1099,7	495,5	3041,9
Ветровал, бурелом	–	–	20,9	4,4	38,2	10,9	–	–	74,4
Подтопление	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Болезни леса	19,4	1,6	7,0	–	–	–	–	–	28,0
Вредители леса	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Итого	19,4	2,6	50,3	31,5	135,5	1316,8	1099,7	495,5	3151,3

Всего насаждений, утративших биологическую устойчивость (III класс), выявлено на площади 178,6 га, что является результатом повреждения хвойных насаждений стволовыми вредителями. Установлено, что за ревизионный период (2012–2019 гг.) на территории Старобинского лесхоза наблюдалось усыхание лесных насаждений на значительной площади. Данные о гибели лесных насаждений Старобинского лесхоза за период с 2012 по 2019 г. приведены в табл. 3.

Характеристика санитарного и экологического состояния лесов Старобинского лесхоза (по материалам лесоустройства за 2011–2020 гг.). Леса, являясь одной из важнейших частей биосферы, выполняют водоохранные, климаторегулирующие, санитарно-гигиенические, рекреационные и другие экологически значимые функции, которые, не имея стоимостных показателей, существенно влияют на состояние воздушного, водного и наземного бассейнов окружающей среды. Ухудшение санитарного и экологического состояния лесов Старобинского лесхоза приводит не только к потере источников древесного сырья, но и экологического равновесия лесных экосистем данного и прилегающих лесхозов в целом. Как видно из данных табл. 3, основными причинами гибели лесных насаждений явилось воздействие неблагоприятных погодных условий и, как следствие, увеличение количества очагов вредителей леса (вершинный короед) – 3041,9 га (96,5%).

На остальные перечисленные причины усыхания лесов Старобинского лесхоза приходится лишь 3,5% от общей площади погибших насаждений. За период 2017–2018 гг. значительно возросла площадь погибших древостоев в результате повреждения короедом и дальнейшего усыхания, которое последовало за природными засухами 2015–2016 гг. В результате ухудшения состояния древостоев произошла интенсивная вспышка численности стволовых вредителей в сосновых древостоях. Как следует из приведенных выше данных (табл. 3), за период 2012–2019 гг. вырублено

около 2950 га сосновых насаждений. Причем увеличение площадей погибших сосняков наблюдалось с 2014 г. В 2017 г. произошло скачкообразное увеличение площади погибших древостоев (с 95,3 га в 2016 г. до 1258,7 га в 2017 г.). Аналогичные тенденции наблюдаются в ельниках, которые в 2018 г. погибли на площади 44 га. В лесхозе еловые насаждения погибли на площади 65 га.

Следует отметить, что среди сосновых насаждений погибали в первую очередь насаждения искусственного происхождения, среди ельников – естественного происхождения. Данная ситуация вызвана тем, что наибольшая доля погибших сосновых лесов лесхоза наблюдается в возрасте 20–80 лет, в том числе в молодняках, средневозрастных и приспевающих насаждениях, значительная часть из которых искусственного происхождения (56%). В ельниках наибольшая доля погибших древостоев отмечена в приспевающих насаждениях, которые в большинстве своем относятся к насаждениям естественного происхождения. В типологическом отношении наибольшая площадь погибших сосновых насаждений относится к мшистой и орляковой сериям типов леса (80,0%). Приведенные в табл. 3 данные свидетельствуют о значительном ухудшении экологического состояния лесных экосистем Старобинского лесхоза за ревизионный период (с 2012 по 2019 гг.).

Согласно данным ГУ «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды», преобладающим направлением ветра в районе г. Солигорска является западное направление (22,5%), которое вместе с юго-западным и северо-западным направлениями составляет более 47%, а скорость передвижения воздушных масс в данном районе составляет более 61 км/ч, что способствует интенсивному переносу складированных на поверхности земли солей натрия и калия в направлении расположения лесных экосистем Старобинского лесхоза и других прилегающих лесных массивов.

С целью получения объективной и полной информации о состоянии лесных экосистем ГЛХУ «Старобинский лесхоз» [12, 13] и других объектов окружающей среды [14], а также об эффективности принимаемых природоохранных мер на территории Солигорского района осуществляется экологический мониторинг за источниками и объемами выбросов в атмосферу, состоянием объектов окружающей среды: атмосферным воздухом, поверхностными и подземными водами, почвами и др.

Заключение. В результате выполненного анализа установлено, что за ревизионный период (2012–2019 гг.) на территории Старобинского лесхоза отмечалось усыхание лесных насаждений на площади 3151,3 га.

Увеличение площадей погибших сосняков в лесхозе наблюдалось с 2014 г. В 2017 г. произо-

шло скачкообразное увеличение площади погибших древостоев (с 95,3 га в 2016 г. до 1258,7 га в 2017 г.). Аналогичные тенденции были замечены и в еловых насаждениях, которые в 2018 г. погибли на площади 44 га. Площадь всех погибших еловых насаждений в Старобинском лесхозе составила 65 га.

Учитывая вышеизложенное, для установления реальных причин гибели лесных насаждений ГЛХУ «Старобинский лесхоз», а также масштабов влияния промышленных выбросов и отходов ОАО «Беларуськалий» на санитарное и экологическое состояние лесных насаждений данного лесхоза и прилегающих лесных экосистем необходимо разработать программу полевых научных исследований по комплексной оценке состояния лесных экосистем, находящихся в зоне расположения данного предприятия.

Список литературы

1. Состояние природной среды Беларуси: экологический бюллетень / Е. И. Громадская [и др.]. Минск: ЦНИИКИВР, 2021. 150 с.
2. Отходы: глава 11 // Экологический бюллетень. 2015. С. 284–303. URL: <http://www.minpriroda.gov.by/uploads/files/glava-11-otxodu.docx> (дата обращения: 27.02.2023).
3. Локальный мониторинг окружающей среды за 2020–2021 гг. // Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь. URL: <http://www.nsmos.by/content/182.html> (дата обращения: 27.02.2023).
4. Питьевая вода и водоснабжение населенных мест. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества: СанПиН 10–124 РБ 99. URL: <https://mshp.gov.by/ohrana/f69c8d0f263870d0.html> (дата обращения: 27.02.2023).
5. Мониторинг лесов, 2006–2021 гг. // Национальная система мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь. URL: <https://www.nsmos.by/content/176.html> (дата обращения: 27.02.2023).
6. Сазонов А. А., Звягинцев В. Б. Массовое усыхание сосновых лесов Беларуси: особенности, причины, последствия / Х Чтения памяти О. А. Катаева. Дендробионтные беспозвоночные животные и грибы и их роль в лесных экосистемах: материалы междунар. конф., Санкт-Петербург, 22–25 окт. 2018 г. СПб., 2018. Т. 2: Фитопатогенные грибы, вопросы патологии и защиты леса. С. 28–29.
7. Сазонов А. А. Усыхание сосновых древостоев Беларуси (2010–2019): работа над ошибками // Лесные экосистемы: современные вызовы, состояние, продуктивность и устойчивость: материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию образования Ин-та леса НАН Беларуси, Гомель, 13–15 нояб. 2020 г. Гомель, 2020. С. 279–283.
8. Усеня В. В. Проблема усыхания сосновых лесов Беларуси и способы ее решения // Наука и инновации. 2020. № 4. С. 18–22.
9. Логинов В. Ф., Лысенко С. А., Мельник В. И. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования. 2-е изд. Минск: Энциклопедикс, 2020. 264 с.
10. Государственный лесной кадастр Республики Беларусь на 01.01.2022. Минск: Белгослес, 2022. 90 с.
11. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь. Статистический сборник / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. Минск, 2021. 203 с.
12. Проект организации и развития лесного хозяйства ГЛХУ «Старобинский лесхоз» на 2011–2021 гг. / М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь; Лесоустроит. респ. унитар. предприятие «Белгослес». Минск, 2011. 340 с.
13. Лесоустроительный проект Государственного лесохозяйственного учреждения «Старобинский лесхоз» Минского государственного производственного лесохозяйственного объединения на 2021–2030 гг. / М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь; Лесоустроит. респ. унитар. предприятие «Белгослес». Гомель, 2020. 255 с.
14. Мониторинг атмосферного воздуха / Мониторинг поверхностных вод / Мониторинг земель (почв) // Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь. URL: <https://www.nsmos.by/content/402.html> (дата обращения: 27.02.2023).

References

1. Gromadskaya E. I., Bakanova D. V., Vodeiko M. V., Mikhalevich R. V., Sushko S. V., Botyan E. A., Polyanskaya I. A. *Sostoyaniye prirodnoy sredy Belarusi: ekologicheskiy byulleten'* [State of the natural environment of Belarus: ecological bulletin]. Minsk, TsNIIKIVR Publ., 2021. 150 p. (In Russian).
2. Waste: chapter 11. *Ekologicheskiy byulleten'* [Environment Bulletin], 2015, pp. 284–303. Available at: <http://www.minpriroda.gov.by/uploads/files/glava-11-otxody.docx> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
3. Local monitoring of the environment for 2020–2021. Available at: <http://www.nsmos.by/content/176.html> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
4. SanPiN 10–124 RB 99. Drinking water and water supply of populated areas. Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control. Available at: <http://mshp.gov.by/ohrana/f69c8d0f263870d0.html> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
5. Forest monitoring, 2006–2021. Available at: <https://www.nsmos.by/content/176.html> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
6. Sazonov A. A., Zvyagintsev V. B. Mass drying of pine forests in Belarus: features, causes, consequences. *X Chteniya pamyati O. A. Kataeva. Dendrobiontnyye bespozvonochnyye zhivotnyye i griby i ikh rol' v lesnykh ekosistemakh: materialy mezhdunarodnoy konferentsii* [X Readings in memory of O. A. Kataev. Dendrobiont invertebrates and fungi and their role in forest ecosystems: materials of the international conference]. St. Petersburg, 2018, vol. 2: Phytopathogenic fungi, issues of pathology and forest protection, pp. 28–29 (In Russian).
7. Sazonov A. A. Drying out of pine stands in Belarus (2010–2019): work on mistakes. *Lesnyye ekosistemy: sovremennyye vyzovy, sostoyaniye, produktivnost' i ustoychivost': materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchenoy 90-letiyu obrazovaniya instituta lesa NAN Belarusi* [Forest ecosystems: modern challenges, state, productivity and sustainability: materials of International Scientific and Practical Conference dedicated to the 90th anniversary of formation Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus]. Gomel, 2020, pp. 279–283 (In Russian).
8. Usenya V. V. The problem of drying out of pine forests in Belarus and ways to solve it. *Nauka i innovatsii* [Nauka i innovatsii], 2020, no. 4, pp. 18–22 (In Russian).
9. Loginov V. F., Lysenko S. A., Melnik V. I. *Izmeneniye klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate Change in Belarus: Causes, Consequences, Regulatory Opportunities]. Minsk, Entsiklopediks Publ., 2020. 264 p. (In Russian).
10. *Gosudarstvennyy lesnoy kadastr Respubliki Belarus' na 01.01.2019* [State Forest Cadaster of the Republic of Belarus, 01.01.2019]. Minsk, Belgosles Publ., 2019. 90 p. (In Russian).
11. *Okhrana okruzhayushchey sredy v Respublike Belarus'. Statisticheskiy sbornik* [Environmental protection in the Republic of Belarus. Statistical compendium]. Minsk, 2021. 203 p. (In Russian).
12. *Proyekt organizatsii i razvitiya lesnogo khozyaystva GLKHU "Starobinskiy forestry" na 2011–2021* [Project for the organization and development of forestry SFT "Starobinsky forestry" for 2011–2021]. Minsk, 2011. 340 p. (In Russian).
13. *Lesoustroitel'nyy proyekt Gosudarstvennogo lesokhozyaystvennogo uchrezhdeniya "Starobinskiy leskhoz" Minskogo gosudarstvennogo proizvodstvennogo lesokhozyaystvennogo ob'yedineniya na 2021–2030 gody* [Forest management project of the State Forestry Institution "Starobinsky forestry" of the Minsk State Industrial Forestry Association for 2021–2030]. Gomel, 2020. 255 p. (In Russian).
14. Atmospheric air monitoring / Surface water monitoring / Monitoring of lands (soils). Available at: <https://www.nsmos.by/content/402.html> (accessed 27.02.2023) (In Russian).

Информация об авторе

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

Information about the author

Maskalchuk Leanid Mikalaevich – DSc (Engineering), PhD (Agricultural), Associate Professor, Professor of the Department of Silviculture. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, The Republic of Belarus). E-mail: lnm@belstu.by

Поступила 15.02.2023

ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЕ И ЛЕСОРАЗВЕДЕНИЕ

FOREST REGENERATION AND FOREST GROWING

УДК 630*232.329.6

В. В. Носников, А. М. Граник, А. В. Юрениа, О. А. Селищева
Белорусский государственный технологический университет

ИЗМЕНЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ТОРФЯНЫХ СУБСТРАТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЕМОМ И УСЛОВИЙ КОМПЛЕКСОВ ПО ВЫРАЩИВАНИЮ КОНТЕЙНЕРИЗИРОВАННЫХ СЕЯНЦЕВ

В статье изложены результаты исследований влияния поливной воды на кислотность и содержание солей в субстратах, используемых для выращивания посадочного материала древесных видов с закрытой корневой системой. Кислотность поливной воды на лесохозяйственных предприятиях имеет нейтральную или слабощелочную реакцию среды (6,77–8,19 рН). При выполнении поливов рН субстрата увеличивается, значительно отклоняясь от оптимальных значений (за 6 месяцев в лабораторных условиях рН субстрата выросло на 1,7–1,8 единицы). Методами регулирования данного процесса являются подкисление поливных вод или подкисление самого субстрата в процессе выращивания посадочного материала. Внесение азотной или серной кислоты позволяет эффективно снизить кислотность воды до необходимого уровня 5,5 рН. Однако следует учитывать, что при этом происходит значительное увеличение содержания солей. Использование гранулированной серы как регулятора кислотности является более целесообразным, так как она действует медленнее, чем кислоты. Также приведена информация по перерасчету количества субстрата из биг-бейла с торфом в ячейку кассеты. Из-за различий технологических процессов набивки кассет коэффициент пересчета варьирует от 1,08 до 1,95. Исходя из обеспечения скелетных функций субстрата и необходимого уровня аэрации корневых систем его можно принять оптимальным 1,3–1,4.

Ключевые слова: субстрат торфяной, влажность субстрата, активная кислотность, плотность, коэффициент пересчета.

Для цитирования: Носников В. В., Граник А. М., Юрениа А. В., Селищева О. А. Изменение качественных параметров торфяных субстратов в зависимости от технологических приемов и условий комплексов по выращиванию контейнеризированных сеянцев // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 28–35. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-4.

V. V. Nosnikov, A. M. Granik, A. V. Yurenina, O. A. Selishcheva
Belarusian State Technological University

CHANGES IN THE QUALITY PARAMETERS OF PEAT SUBSTRATES DEPENDING ON THE TECHNOLOGICAL METHODS AND CONDITIONS OF COMPLEXES FOR GROWING CONTAINERIZED SEEDLINGS

The article presents the results of studies of the effect of irrigation water on the acidity and salt content in the substrates used for growing planting material of tree species with a closed root system. The acidity of irrigation water at forestry enterprises has a neutral or slightly alkaline reaction of the environment (6.77–8.19 pH). When irrigating, the pH of the substrate increases, significantly deviating from the optimal values (for 6 months under laboratory conditions, the pH of the substrate increased by 1.7–1.8 units). Methods for regulating this phenomenon are acidification of irrigation water or acidification of the substrate itself in the process of growing planting material. The introduction of nitric or sulfuric acid can effectively reduce the acidity of water to the required level of 5.5 pH. However, it should be borne in mind that in this case there is a significant increase in the content of salts. The use of granulated sulfur as an acidity regulator is more appropriate. Its action is slower compared to acids. It also provides information on recalculating the amount of substrate from a big-bale with peat into a

cassette cell. Due to the differences in the technological processes of stuffing cassettes, the conversion factor varies from 1.08 to 1.95. Based on the provision of the skeletal functions of the substrate and the required level of aeration of the root systems, it can be taken as optimal 1.3–1.4.

Keywords: peat substrate, substrate moisture, active acidity, density, conversion factor.

For citation: Nosnikov V. V., Granik A. M., Yurenin A. V., Selishcheva O. A. Changes in the quality parameters of peat substrates depending on the technological methods and conditions of complexes for growing containerized seedlings. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resource*, 2023, no. 2 (270), pp. 28–35. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-4 (In Russian).

Введение. Субстраты на основе верхового торфа являются наиболее распространенными средами для выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой (ЗКС) [1, 2]. Для получения качественного посадочного материала необходим субстрат, обеспечивающий питание растений и нормальное развитие корневой системы [3–5]. Клеточная структура сфагнового торфа обеспечивает высокую влагоемкость и воздухоемкость [6–8]. Благоприятное соотношение воздух/вода, низкая скорость разложения в контейнерах при частых поливах обуславливаются сочетанием различных свойств верхового торфа [8]. Субстрат для семян древесных видов должен обладать определенными физическими свойствами (плотность, высокая влагоемкость, буферность, оптимальная пористость, высокая сорбционная и водоудерживающая способность), поскольку их невозможно будет изменить в процессе выращивания [9–11]. Важным агрофизическим свойством субстрата является также насыпная плотность [12].

Основная часть. Одной из важных составляющих планирования технологического процесса выращивания посадочного материала с ЗКС является расчет необходимого для заполнения кассет субстрата. Заказ недостаточного количества торфа может привести к простоям линии наполнения кассет и срыву графика высева, а в дальнейшем – к смещению графика ротаций на менее благоприятное время. Заказ излишнего торфа приведет к формированию остатков, использование которых в следующем году нежелательно вследствие протекающих в биг-бейле реакций.

Основная проблема при расчете необходимого количества торфа возникает в особенностях определения объемного веса на торфопредприятии и при расчете необходимого количества торфа для нужд специализированного центра. В первом случае используется насыпной торф, во втором же случае необходимо рассчитать объем уплотненного торфа, степень уплотнения которого зависит от применяемого на линии оборудования и параметров его настройки.

Наиболее существенное влияние на динамику показателей качества субстрата среди различных

проводимых агротехнических мероприятий оказывает проведение поливов. При выращивании посадочного материала с ЗКС в теплицы и на поля доращивания вносится значительное количество воды. Так, за один полив в теплицу площадью 1000 м² вносится от 1,5 до 5 т воды.

Существенным вопросом при поливе является качество воды, а ключевыми параметрами при этом ее кислотность и содержание солей. Поскольку субстрат обладает определенной исходной кислотностью, то использование для полива воды с нейтральной или щелочной реакцией среды будет приводить к изменению значения pH субстрата. Содержание солей воздействует на качественные параметры несколькими путями. С одной стороны, наличие в воде солей кальция и магния, а также гидрокарбонатов приводит к запуску процессов нейтрализации реакции среды субстрата. С другой стороны, постоянное добавление солей с водой будет способствовать их накоплению, в результате чего могут наблюдаться процессы угнетения роста и даже гибели растений в связи с высокой концентрацией солей в почвенном растворе.

Для расчета данных показателей были отобраны образцы поливной воды в лесхозах республики. В табл. 1 представлены результаты определения кислотности pH и удельной электропроводности (ЕС).

Таблица 1
Кислотность и удельная электропроводность поливной воды

Лесхоз	pH	ЕС, мкСм/см
Ивацевичский	6,84	218,7
Поставский	7,08	562,5
Россонский	7,06	432,6
Бегомльский	7,15	349,0
Лепельский	6,80	402,7
Городокский	8,10	194,5
Глубокский	8,15	574,0
Логойский	7,52	1152,0
Воложинский	7,85	372,3
Смолевичский	6,77	195,9
Ивьевский	7,07	356,0
Островецкий	7,06	438,0
РЛССЦ	8,19	443,7

Как видно из таблицы, кислотность поливной воды имеет нейтральную или слабощелочную реакцию. Для изучения влияния поливной воды на изменение кислотности верхового торфа в лабораторных условиях был поставлен эксперимент. В исходном торфе была определена кислотность рН в вытяжке раствора 1 н КСl [13] в трехкратной повторности, которая в среднем составила 2,47. Величина электропроводности торфа [14], определяемая в водной вытяжке, составила в среднем 5 мкСм/см.

Исходный торф помещен в увлажненном состоянии в кассеты с уплотнением, соответствующим плотности набивки кассет при производственном процессе. При проведении эксперимента торф в кассетах регулярно увлажнялся: дистиллированной водой до влажности из расчета на влажную навеску 60% [15]; водопроводной водой до влажности – 50 и 60% соответственно по вариантам. Периодический анализ величины рН водопроводной воды показал, что динамика этого показателя была в пределах от 7,61 до 7,87. Величина электропроводности воды составила в среднем 457 мкСм/см. Свежеприготовленная дистиллированная вода имела величину рН в пределах 6,9–7,0 и электропроводность 4 мкСм/см. С заданной очередностью определялась величина рН в торфе при добавлении воды (табл. 2).

На основании лабораторного моделирования было установлено, что регулярные поливы водой с кислотностью более 7,5 рН и высокой степенью содержания солей приводят к увеличению значения рН субстрата на 1,7–1,8 единицы.

Наиболее простым способом регулирования кислотности воды является использование кислот. Нами были проведены эксперименты по снижению величины рН воды с использованием серной и азотной кислот. Выявлено, что серная кислота – наиболее эффективный подкислитель, а азотная обеспечивает растения дополнительным азотом.

Внесение как азотной, так и серной кислоты позволяет эффективно снизить кислотность воды до необходимого уровня, составляющего 5,5 рН. Однако следует учитывать, что при подкислении воды неорганическими кислотами происходит значительное увеличение показателя ЕС, что требует постоянного контроля об-

щего засоления почвенного раствора путем изменения его ЕС. Использование данного метода мало перспективно еще и по причине неблагоприятного влияния кислоты на детали поливных систем.

Более целесообразным является применение в качестве регулятора кислоты гранулированной серы. Ее действие более медленное по сравнению с воздействием минеральных кислот. Процесс подкисления на 1,0 рН достигает промежутка двух недель, однако сера имеет заметный пролонгированный эффект. При анализе субстратов, используемых в течение вегетационного периода в Глубокском опытном лесхозе, Ивацевичском и Могилевском лесхозах и РЛССЦ, установлено, что за вегетационный период значение кислотности субстрата практически нигде не изменилось, за исключением РЛССЦ. Там произошло увеличение рН на 0,6–1,6, в то время как на участках без применения серы повышение рН составляло 2,3–2,8.

Поставка торфяного субстрата на различные лесохозяйственные предприятия по приготовлению кассет для выращивания посадочного материала с ЗКС производится в специализированных биг-бейлах различного насыпного объема. Их параметры по ширине и длине составляют в среднем 120×100 см, а высота около 200 см. В табл. 3 представлены основные параметры биг-бейлов субстрата различных партий, поставляемых на специализированные центры по выращиванию посадочного материала ЗКС.

Как видно из приведенной таблицы, насыпные объемы в разных партиях варьируют от 4,5 до 5,5 кг/м³. При этом насыпная плотность остается фактически на одном уровне (около 170 кг/м³). Влажность отобранных образцов составляет в среднем 46,7–62,0%, варьируя в пределах 10%.

При заполнении кассет субстратом необходимо определять его расход в зависимости от наполняемости и уплотнения. На эти показатели оказывает влияние особенность процесса наполнения кассет, их параметры и режим их увлажнения. Предприятия обеспечены оборудованием различных производителей, которое применяется для заполнения кассет торфяным субстратом и имеет различную конструкцию и технологию набивки и уплотнения субстрата.

Таблица 2

Изменение реакции среды верхового торфа при поливе

Варианты добавления воды при различной влажности торфа	Величина рН в КСl				
	исходная	через 1 месяц	через 2 месяца	через 4 месяца	через 6 месяцев
Дистиллированная, влажность на влажную навеску торфа 60%	2,47	2,50	2,54	2,53	2,57
Водопроводная, влажность на влажную навеску торфа 50%	2,47	3,04	3,83	4,03	4,15
Водопроводная, влажность на влажную навеску торфа 60%	2,47	3,18	4,01	4,17	4,26

Таблица 3

Основные параметры биг-бейло субстрата различных партий

№ варианта	Параметры биг-бейла			Размер фракции торфа	Насыпная плотность, кг/м ³	Дата выпуска
	номер	насыпной объем, м ³	масса, кг			
Республиканский лесной селекционно-семеноводческий центр						
1	2291	4,5	765	0–15	170,0	14.05.2022
2	2268	4,5	746	0–15	165,8	14.05.2022
3	2288	4,5	794	0–15	176,4	14.05.2022
4	2286	4,5	814	0–15	180,9	14.05.2022
5	2290	4,5	781	0–15	173,6	14.05.2022
6	2257	4,5	764	0–15	169,8	14.05.2022
7	2296	4,5	759	0–15	168,7	14.05.2022
8	2267	4,5	857	0–15	190,4	14.05.2022
9	2263	4,5	793	0–15	176,2	14.05.2022
10	2223	4,5	671	0–15	149,1	14.05.2022
Среднее по РЛССЦ		4,5	774,4	–	172,1	–
Могилевский лесхоз						
1	8	5,3	852	–	160,8	06.07.2022
Ивацевичский лесхоз						
1	2854	5,5	974	0–15	177,1	23.05.2022
2	2852	5,5	944	0–15	171,6	23.05.2022
3	2856	5,5	975	0–15	177,3	23.05.2022
4	2858	5,5	984	0–15	178,9	23.05.2022
Среднее по лесхозам		5,5	969,3	–	176,2	–

На РЛССЦ оборудование для набивки кассет произведено итальянской фирмой MossaGreen. Уплотнение субстрата на нем осуществляется вибрацией и пластиковыми толкателями. В Глубокском опытном лесхозе оборудование выпущено шведской фирмой ВСС и имеет аналогичную конструкцию. В Могилевском лесхозе установлено оборудование итальянской фирмы MossaGreen, имеющее вибропресс и щетки, с помощью которых происходит уплотнение.

Ивацевичский лесхоз оснащен оборудованием фирмы Urbinatti (Италия), уплотнение на котором достигается только вибрацией. В результате возникла необходимость сравнить на различных предприятиях равномерность и од-

нородность заполнения кассет для выращивания посадочного материала с ЗКС на различных предприятиях и рассчитать коэффициенты пересчета субстрата для использования на различных линиях.

Наиболее доступным для определения параметром наполнения кассет субстратом является их масса. Плотность субстрата при использовании различного оборудования и процесса наполнения может меняться. Для определения параметров кассет, применяемых при выращивании посадочного материала с ЗКС, изначально были определены объемы ячеек в кассетах различных марок и ее общий объем для заполнения торфяным субстратом (табл. 4).

Таблица 4

Массы субстрата в ячейках кассет в зависимости от используемого оборудования

Марка кассеты	Объем, см ³		Масса субстрата в кассете, г		Масса субстрата в ячейке, г	
	ячейки	кассеты	влажного	на абсолютно сухую массу	влажного	на абсолютно сухую массу
Глубокский опытный лесхоз						
F35	275	9625	2863	985	84,21	28,13
Республиканский лесной селекционно-семеноводческий центр						
FD64	128	8192	2480	737	38,75	11,50
F64	115	7360	2831	867	44,23	13,55
Могилевский опытный лесхоз						
FD64	128	8192	3225	1416	50,39	22,13
F100	81	8100	2784	1246	27,84	12,45
Ивацевичский лесхоз						
F64	115	7360	3476	884	54,31	13,83

Таблица 5

Плотность абсолютно сухого субстрата в зависимости от марки кассеты и слоя в ячейке

Марка кассеты	Наименование слоя	Средняя плотность, кг/м ³	Минимальная плотность, кг/м ³	Максимальная плотность, кг/м ³
F35	Верхний	71,40	58,93	85,65
	Средний	117,12	109,38	123,23
	Нижний	146,48	128,57	181,04
	Средний по ячейке	111,67	–	–
F64	Верхний	127,17	98,85	148,27
	Средний	112,11	77,44	161,82
	Нижний	131,37	88,89	181,39
	Средний по ячейке	123,55	–	–

Масса торфяного субстрата, помещающегося в кассеты, составляет от 737 до 1416 г на абсолютно сухую навеску. При этом сравнительный анализ одинаковых кассет FD64 показал, что их заполнение субстратом на РЛССЦ и в Могилевском опытном лесхозе отличается в 1,92 раза, на что оказывают влияние разные технологические процессы наполнения кассет. Сравнение одинаковых кассет F64 показало, что их заполнение на РЛССЦ и в Ивацевичском лесхозе имеет незначительные различия в 1,02 раза, и технологические процессы наполнения практически не оказывают на это влияние.

Также было проведено изучение плотности субстрата в ячейке. Для этого каждую ячейку разделили на три слоя: верхний, средний и нижний. Исследование проводилось для двух типов кассет. С каждого слоя отбирался субстрат и высушивался до абсолютно сухого состояния для исключения влияния влажности при сравнении масс. Результаты исследования представлены в табл. 5.

Кассета F35 была отобрана в Глубокском опытном лесхозе, где кассеты набиваются на линии ВСС (Швеция). Уплотнение нижнего и частично среднего слоя осуществляется пластиковым толкателем, что вызывает достаточно сильное уплотнение субстрата в нижнем слое

ячейки и более слабое в среднем. После уплотнения верхняя часть ячейки заполняется сыпучим торфом, уплотнение которого осуществляется только за счет вибрации. В результате плотность субстрата в верхней части ячейки практически в два раза отличается от плотности субстрата в нижней ее части.

Кассета F64 была отобрана в Ивацевичском лесхозе. Заполнение кассет осуществлялось на итальянской линии Urbinatti с уплотнением только за счет вибрации. В результате наблюдалось более интенсивное уплотнение ячейки, но меньшая плотность субстрата в среднем слое.

В процессе наполнения кассет торфяным субстратом с частичным увлажнением его плотность увеличивается по сравнению с поставляемым в биг-бейлах на предприятия. Для этого был проведен анализ торфяного субстрата в заполняемых кассетах на линии высева с учетом влажности субстрата. На основании полученных данных определены коэффициенты пересчета (табл. 6).

Довольно рыхлый субстрат с плотностью на абсолютно сухую массу в пределах 0,1 г/см³ формируется в кассетах F35 с самой большой по объему ячейкой, которую используют в Глубокском опытном лесхозе.

Таблица 6

Коэффициенты пересчета объемов поставляемого субстрата в зависимости от применяемого оборудования и параметров кассет

Марка кассеты	Объем, см ³		Масса абсолютно сухого субстрата, г		Плотность абсолютно сухого субстрата, г/см ³		Коэффициент пересчета объемов субстрата
	ячейки	кассеты	ячейки	кассеты	ячейки	биг-бейла	
Глубокский опытный лесхоз							
F35	275	9625	28,13	985	0,102	0,081	1,26
Республиканский лесной селекционно-семеноводческий центр							
FD64	128	8192	11,50	737	0,090	0,083	1,08
F64	115	7360	13,55	867	0,118	0,083	1,42
Могилевский лесхоз							
FD64	128	8192	22,13	1416	0,173	0,079	2,19
F100	81	8100	12,45	1246	0,154	0,079	1,95
Ивацевичский лесхоз							
F64	115	7360	13,83	884	0,120	0,077	1,56

Более плотно, в пределах $0,12 \text{ г/см}^3$, субстрат заполняет кассеты F64. При этом нет значительных различий показателей в РЛССЦ и Ивацевичском опытном лесхозе. Наполнение кассет FD64 имеет значительные различия в РЛССЦ и Могилевском опытном лесхозе за счет разных технологических процессов. Плотность набивки во втором учреждении в 1,92 раза больше, а коэффициент пересчета составляет 2,19. Субстрат в кассетах F100 в Могилевском опытном лесхозе имеет плотность $0,154 \text{ г/см}^3$, что также больше по сравнению с другими предприятиями как по плотности, так и по коэффициенту пересчета.

Такая дифференциация в коэффициентах пересчета не позволяет установить единый коэффициент, применимый для всех без исключения центров при условии сохранения текущей настройки линий. Однако исходя из обеспечения скелетных функций субстрата и необходимого уровня аэрации корневых систем можно принять оптимальным коэффициент пересчета 1,3–1,4. Именно к обеспечению этого коэффициента следует приводить настройки линий по заполнению кассет.

Для определения коэффициента пересчета можно использовать следующую формулу:

$$K = \frac{m_{\text{тк}} \cdot v_{\text{тб}} \cdot 1000 \cdot 0,7}{m_{\text{тб}} \cdot v_{\text{к}}},$$

где $m_{\text{тк}}$ – масса торфа в кассете после набивки на линии (до посева), г; $v_{\text{к}}$ – объем ячеек в кассете, см^3 ; 1000 – переводной коэффициент, кг/м^3 ; 0,7 – переводной коэффициент на влажность 70%; $m_{\text{тб}}$ – масса нетто торфа в биг-бейле, кг; $v_{\text{тб}}$ – насыпной объем торфа в биг-бейле, м^3 .

Заключение. Наиболее простым способом регулирования кислотности воды для полива субстрата является использование кислот. Внешение как азотной, так и серной кислоты позволяет эффективно снизить кислотность воды до необходимого уровня 5,5 pH. Однако следует

учитывать, что при подкислении воды неорганическими кислотами происходит значительное увеличение показателя ЕС.

Использование гранулированной серы в качестве регулятора кислотности является более целесообразным по сравнению с азотной кислотой из-за более медленного действия серы.

При анализе субстратов, используемых в течение вегетационного периода в Глубокском опытном лесхозе, Ивацевичском, Могилевском лесхозах и РЛССЦ установлено, что за вегетационный период значение кислотности субстрата практически нигде не изменилось, за исключением РЛССЦ. Там произошло увеличение pH на 0,6–1,6.

Сравнительный анализ одинаковых кассет FD64 показал, что плотность их заполнения субстратом на РЛССЦ и в Могилевском опытном лесхозе имеет различия в 1,92 раза, на что оказывают влияние разные технологические процессы наполнения кассет. Сравнение одинаковых кассет F64 меньшей высоты показало, что способы их заполнения субстратом на РЛССЦ и в Ивацевичском лесхозе с использованием толкателей и вибрации соответственно имеют незначительные различия в 1,02 раза.

Определение коэффициентов пересчета показало, что соотношение плотности субстрата в биг-бейлах и кассетах при размере ячейки 275 см^3 составило 1,26. При размерах ячейки 115 см^3 коэффициент пересчета находился в пределах от 1,42 до 1,56. Высокий коэффициент (1,95) наблюдался в кассетах F100. Уплотнение субстрата напрямую зависело от применяемого на предприятии оборудования. Исходя из обеспечения скелетных функций субстрата и необходимого уровня аэрации корневых систем можно принять оптимальным коэффициент пересчета 1,3–1,4. Именно к достижению этого коэффициента следует приводить настройки линий по заполнению кассет.

Список литературы

1. Кузнецова Л. М., Михайлов А. В., Селеннов В. Г. Искусственные почвенные грунты // Вестн. Томск. гос. пед ун-та. 2009. № 3 (81). С. 145–150.
2. Куропатина Н. Д. Субстраты для тепличных хозяйств: качество и эффективность // Гавриш. 2011. № 1. С. 28–32.
3. Landis T. D., Tinus R. W. Containers and growing media // Container Tree Nursery Manual / McDonald S. E. [et al.] Washington, DC, USA, 1990. P. 1–67.
4. Родин А. Р., Родин С. А. Повышение результативности выращивания лесных культур посадочным материалом с закрытой корневой системой // Вестн. МГУЛ. 2010. № 5. С. 54–58.
5. Козловская И. П. Экологическая оценка субстратов и анализ расхода элементов питания при малообъемном выращивании томата в зимних теплицах // Живые и биокосные системы. URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-6/article-7> (дата обращения: 04.12.2022).
6. Schmilewski G. The role of peat in assuring the quality of growing media // Mires and Peat. 2008. Vol. 3, no. 2. P. 1–8.
7. Костюк Н. С. Физика торфа. Минск: Выш. шк., 1967. 213 с.
8. Bragg N. C. Peat and its Alternatives. Horticultural Development Council. Petersfield: Hampshire, 1990. 109 p.

9. Allaire-Leung S. E. Changes in physical properties of peat substrates during plant growth // *J. Can Soil Sci.* 1999. Vol. 79. P. 137–139.
10. Best management practices: Guide for producing container-grown plants / Т. Н. Yeager [et al.] // *Southern Nurserymen's Assoc.* 2007. No. 3. P. 200–203.
11. Effects of the maturity of wood waste compost on the structural features of humic acids / Fukushima M. [et al.] // *Bioresource Technology.* 2009. Vol. 100, no. 2. P. 791–797.
12. Выращивание сеянцев сосны обыкновенной и березы повислой с закрытой корневой системой на субстратах с различной насыпной плотностью / Д. И. Мухортов [и др.] // *Вестн. Поволж. гос. техн. ун-та. Сер. Лес. Экология. Природопользование.* 2022. № 1 (53). С. 47–59.
13. Торф и продукты его переработки для сельского хозяйства. Методы определения обменной и активной кислотности: ГОСТ 11623–89. М.: Изд-во стандартов, 1990. 6 с.
14. Торф и продукты его переработки для сельского хозяйства. Методы определения содержания водорастворимых солей: ГОСТ 27894.9–88. М.: Изд-во стандартов, 1990. 4 с.
15. Торф. Методы определения влаги: ГОСТ 11305–85. М.: Изд-во стандартов, 1985. 8 с.

References

1. Kuznecova L. M., Mihajlov A. V., Selenov V. G. Artificial soils. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State Pedagogical University], 2009, no. 3 (81), pp. 145–150 (In Russian).
2. Kuropatina N. D. Greenhouse substrates: quality and efficiency. *Gavrish* [Gavrish], 2011, no. 1, pp. 28–31 (In Russian).
3. Landis T. D., Tinus R. W., McDonald S. E. Containers and growing media. *Container Tree Nursery Manual.* Washington, DC, USA, 1990. 67 p.
4. Rodin A. R., Rodin S. A. Improving the efficiency of growing forest crops with planting material with a closed root system. *Vestnik MGUL* [Bulletin of MGUL], 2010, no. 5, pp. 54–58 (In Russian).
5. Kozlovskaja I. P. Ecological assessment of substrates and analysis of the consumption of batteries in low-volume tomato cultivation in winter greenhouses. Available at: <http://www.jbks.ru/archive/issue-6/article-7> (accessed 04.12.2022) (In Russian).
6. Shmylevski G. The role of peat in assuring the quality of growing media. *Mires and Peat*, 2008, vol. 3, no. 2, pp. 1–8.
7. Kostjuk N. S. *Fizika torfa* [Physics of peat]. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1967. 213 p. (In Russian).
8. Bragg N. C. Peat and its Alternatives. Horticultural Development Council. Petersfield, Hampshire, 1990. 109 p.
9. Allaire-Leung S. E. Changes in physical properties of peat substrates during plant growth. *Journal Can Soil Science*, 1999, vol. 79, pp. 137–139.
10. Yeager T. H., Bilderback T., Fare D., Gilliam C., Lea-Cox J., Niemiera A., Ruter J., Tilt K., Warren S., Whitwell T., Wright R. Best management practices: Guide for producing container-grown plants. *Southern Nurserymen's Assoc.* 2007, no. 3. pp. 200–203.
11. Fukushima M., Yamamoto K., Ootsuka K., Komai T., Aramaki T., Ueda S., Horiya S. Effects of the maturity of wood waste compost on the structural features of humic acids. *Bioresource Technology.* 2009, vol. 100, no. 2, pp. 791–797.
12. Mухортов Д. И., Антропова А. В., Окач М. А., Мажоров Н. Д. Growing seedlings of Scots pine and silver birch with a closed root system on substrates with different bulk density. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Volga State Technological University], issue Forest. Ecology. Nature. Management, 2022, no. 1 (53), pp. 47–59 (In Russian).
13. GOST 11623–89. Peat and products of its processing for agriculture. Methods for determining exchange and active acidity. Moscow, Standartinform Publ., 1990. 6 p. (In Russian).
14. GOST 27894.9–88. Peat and products of its processing for agriculture. Methods for determining the content of water-soluble salts. Moscow, Standartinform Publ., 1990. 4 p. (In Russian).
15. GOST 11305–85. Peat. Methods for determining moisture. Moscow, Standartinform Publ., 1985. 8 p. (In Russian).

Информация об авторах

Носников Вадим Валерьевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: nosnikov@belstu.by

Граник Александр Михайлович – магистр сельскохозяйственных наук, ассистент кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: granik@belstu.by

Юрениа Андрей Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: urenya@belstu.by

Селищева Оксана Александровна – кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: oksana_selishchava@mail.ru

Information about the authors

Nosnikov Vadim Valer'evich – 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: nosnikov@belstu.by

Granik Aleksandr Mikhaylovich – Master of Agriculture, assistant lecturer, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: granik@belstu.by

Yurenya Andrey Vladimirovich – 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: urenya@belstu.by

Selishcheva Oksana Aleksandrovna – PhD (Agriculture), Senior Lecturer, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: oksana_selishchava@mail.ru

Поступила 15.03.2023

УДК 630*232

В. В. Носников¹, М. М. Босовец¹, О. А. Селищева¹, М. И. Баркун²¹Белорусский государственный технологический университет²Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий

Национальной академии наук Беларуси

**ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ
НА ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ СЕЯНЦЕВ СОСНЫ И ЕЛИ
С ЗАКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ**

В статье приведены результаты исследования влияния интенсивности светодиодного освещения на фазы развития и рост сеянцев сосны обыкновенной и ели европейской с закрытой корневой системой. Исследования проводились при трех уровнях интенсивности освещения: 109, 221 и 307 мкмоль/м²/с. Выявлена зависимость интенсивности освещения и скорости наступления фаз развития сеянцев. Начало фазы раскрытия семядолей наступило на 12-й день для растений из секции со средней и высокой интенсивностью освещения и с 13-го дня для секции со слабым освещением. Фаза появления почки зачаточного побега фактически начинает хвоевую стадию развития сеянцев сосны и ели. Первые почки зачаточного побега у сосны обыкновенной начали появляться на 12-й день, а у ели европейской – на 13-й день. Фаза разворачивания настоящей хвои протекала практически параллельно с образованием почки зачаточного побега. Отставание составляло 1 день как для сосны обыкновенной, так и для ели европейской. Для обоих пород интенсивность разворачивания настоящей хвои значительно выше при средней и высокой интенсивности освещения по сравнению с низкой. При использовании фотопериода 13 ч наступило заложение верхушечных почек как у сосны, так и у ели. При увеличении продолжительности фотопериода на 1 ч активизировались ростовые процессы, что привело к увеличению высоты сеянцев в течение месяца для сосны на 43,4–67,3%, для ели на 5,2–28,4%.

Ключевые слова: освещение светодиодное, сосна обыкновенная, ель европейская, фазы развития.

Для цитирования: Носников В. В., Босовец М. М., Селищева О. А., Баркун М. И. Влияние интенсивности светодиодного освещения на особенности развития сеянцев сосны и ели с закрытой корневой системой // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (276). С. 36–45. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-5.

V. V. Nosnikov¹, M. M. Bosovets¹, O. A. Selishcheva¹, M. I. Barkun²¹Belarusian State Technological University²Center of LED and Optoelectronic Technologies
of the National Academy of Sciences of Belarus**INFLUENCE OF LED LIGHT INTENSITY ON THE DEVELOPMENT FEATURES
OF CONTAINERIZED PINE AND SPRUCE SEEDLINGS**

The article presents the results of the research of LED light intensity influence on the stages of development and growth of containerized seedlings of Scots pine and European spruce growing in a closed system. We used three levels of light intensity: 109, 221 and 307 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. A direct correlation between light intensity and the rate of phase onset was detected. The beginning of the phase of cotyledon opening occurred on day 12 for plants from the section with medium and high light intensity, and from day 13 for the section with low light intensity. The phase of bud emergence of an embryonic shoot actually begins the coniferous stage of development of pine and spruce seedlings. The first buds of an embryonic shoot in Scots pine began to appear on day 12, and in European spruce – on day 13. The phase of deployment of true needles runs almost parallel to the formation of buds of an embryonic shoot. The lag is 1 day for both Scots pine and European spruce. For both species, intensity of true needles unfurling is significantly higher at medium and high light intensity compared to low light intensity. Using a photoperiod of 13 hours leads to the establishment of apical buds in both pine and spruce. When the duration of photoperiod was increased by 1 hour, the growth processes were activated, which led to an increase in the height of seedlings within a month for pine by 43.4–67.3%, and by 5.2–28.4% for spruce.

Keywords: LED lighting, Scots pine, European spruce, phases of development.

For citation: Nosnikov V. V., Bosovets M. M., Selishcheva O. A., Barkun M. I. Influence of LED light intensity on the development features of containerize pine and spruce seedlings. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 36–45. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-5 (In Russian).

Введение. Успешность роста и развития лесных древесных растений напрямую зависит от получения необходимого количества солнечной радиации. Недостаток солнечного света приводит к изменению физиологических процессов, ограничению роста и появлению различного рода деформаций, что в целом негативно сказывается на качестве посадочного материала, в том числе с закрытой корневой системой. Однако переизбыток солнечной радиации также способен вызывать негативные явления в растениях, а в отдельных случаях приводить к некрозу тканей и даже гибели всего растения.

При выращивании в контролируемых условиях закрытого грунта особую важность приобретает интенсивность и качество искусственного освещения. От интенсивности излучения зависит не только качество продукции, но и экономическая составляющая процесса выращивания посадочного материала. Высокая интенсивность излучения может обеспечить высокие результаты, однако такой подход приведет к высоким затратам электроэнергии и не всегда оправдан. Соответственно, важным моментом является определение оптимальной интенсивности излучения, позволяющей достичь высокого качества посадочного материала при относительно невысоких затратах электроэнергии.

Основная часть. Растения чувствительны к различным аспектам света, таким как качество, количество, продолжительность и направление [1].

Интенсивность света также является ключевым фактором окружающей среды для развития растений, поскольку снижение фотосинтетически активной радиации (ФАР) напрямую влияет на фотосинтез и фотоморфогенез [2, 3]. Недостаточное освещение вызывает у растений ряд негативных процессов, приводящих к снижению ростовых процессов. В ходе эволюционного развития растения использовали различные адаптивные стратегии для уменьшения потенциального ущерба, вызванного как избыточным, так и недостаточным освещением.

Исследования показали, что растения могут уменьшить прямое поглощение световой энергии путем изменения морфологической и фотосинтетической пластичности, например с помощью уменьшения удельной массы листа, увеличения удельной площади листа или повышения способности использования света за счет снижения точки светового насыщения и нижней точки световой компенсации [4].

При исследовании интенсивности освещения в целом основной упор необходимо делать на количестве фотосинтетически активной радиации (ФАР), значение которой для искусственного освещения выражается через фотосинтетическую фотонную облученность (ФФО) в $\text{мкмоль}/\text{м}^2/\text{с}$. Эта единица описывает количество фотонов света в фотосинтетическом диапазоне волн (400–700 нм), которую площадь 1 м^2 получает в секунду.

Оценка возможной интенсивности искусственного освещения при выращивании лесного посадочного материала должна базироваться на оценке естественного освещения, формируемого солнечным светом с учетом географического расположения. Поступление солнечной радиации зависит не только от географического положения Беларуси и ее регионов, но и от продолжительности солнечного сияния, наличия облаков и т. д. Например, на севере Беларуси самый длинный день в 2,5 раза длиннее наиболее короткого, на юге – в 2,1 раза [5].

Что касается фотосинтетической фотонной облученности, то для 55° с. ш. максимальное ее значение приходится на июль и составляет приблизительно $700 \text{ мкмоль}/\text{м}^2/\text{с}$. Минимальным значением можно считать примерно $600 \text{ мкмоль}/\text{м}^2/\text{с}$ [6], которое соответствует марту. Во второй половине этого месяца можно начинать высеv первой ротации посадочного материала при использовании трехротационной схемы выращивания, которая используется, например, Республиканским лесным селекционно-семеноводческим центром.

Однако учитывать максимальные значения ФФО солнечного света для контролируемых условий не совсем правильно, поскольку растения могут успешно произрастать в широком диапазоне освещенностей, особенно это касается лесных древесных растений. Они приспособлены для произрастания под пологом материнского древостоя и выносят иногда достаточно сильное затенение, особенно на начальном периоде роста и развития. Более того, древесные растения, относящиеся к группе теневыносливых, к которым принадлежит ель европейская, оказываются чувствительны к высокой интенсивности фотонного облучения, которая может вызывать хлороз у сеянцев [7]. Использование максимального значения ФФО помимо негативного воздействия на растения приведет к увеличенным затратам электроэнергии, что, соответственно, увеличит себестоимость выращивания посадочного материала.

Анализ зарубежного опыта исследования роста древесных растений под влиянием светодиодного освещения показал, что успешно выращивать их можно при интенсивности фотонного облучения в районе $200 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$.

Например, при выращивании черешни и кизила турецкими учеными использовались светодиодные светильники с интенсивностью фотосинтетического облучения $200 \pm 20 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$ и фотопериодом 14 ч [8]. При оценке ламп с различным спектром они установили положительное влияние именно светодиодного освещения на морфологические характеристики растений.

Изучением влияния качества света и его интенсивности на рост сосны обыкновенной и ели европейской достаточно глубоко занимались в Швеции [7]. Исследование проводилось при интенсивности фотосинтетического излучения в диапазоне от 50 до $400 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$. По данным ученых, не было обнаружено линейной зависимости между ростом деревьев и интенсивностью излучения. Однако для более теневыносливой ели европейской оптимальной интенсивностью считался диапазон от 100 до $200 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$. Для светолубивой сосны обыкновенной оптимум составлял около $200 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$. При меньшей интенсивности излучения происходило удлинение побегов, однако существенных изменений диаметра не обнаруживалось. При большей интенсивности увеличивалась сухая масса растений, но не было заметно влияния на корневые системы. В то же время при максимальной интенсивности $400 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$ наблюдалось пожелтение хвои как для сосны обыкновенной, так и для ели европейской. Измерение флуоресценции хлорофилла показало уменьшение данного пигмента с увеличением интенсивности излучения, причем для ели европейской минимум наблюдался уже при $200 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$, для сосны обыкновенной – при $400 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$.

Китайские и шведские ученые в кооперации для оценки влияния монохроматического света использовали интенсивность фотосинтетического облучения $50 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$ [9].

Российские ученые проводили выращивание семян сосны обыкновенной при интенсивности ФФО $130 \pm 10 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$ с использованием как флуоресцентных ламп, так и светодиодных [10]. Они установили, что недостаток определенных частей спектра негативно влияет на рост сосны, относящейся к группе светолубивых.

Помимо интенсивности фотонного облучения важную роль в жизни растений играет продолжительность фотопериода – промежутка, в течение которого будет включен источник освещения [11, 12]. Недостаточная продолжительность фотопериода может вызывать ускоренное

наступление состояния покоя растений [13]. Это свойство активно используется для стимулирования процессов подготовки к зимнему хранению посадочного материала с закрытой корневой системой за счет активации соответствующих генов [14, 15]. Увеличенная продолжительность фотопериода при использовании искусственного освещения приведет, как минимум, к перерасходу электроэнергии.

При выборе продолжительности фотопериода для проведения исследований мы ориентировались на длину светового дня конца марта – начала апреля, которая составляла 13 ч. В специализированных комплексах по выращиванию посадочного материала с закрытой корневой системой высева первой ротации ели европейской может начинаться с середины марта. С учетом того, что семена прорастают в конце марта – начале апреля, то первая ротация посадочного материала с ЗКС вступает в фазу развертывания семядолей и становится фотосинтетически активной [16]. Этот период характеризуется достаточно напряженным для растений световым режимом, вызванным коротким световым днем и низкой интенсивностью солнечного света. Так, например, при наблюдении за ростом и развитием посадочного материала с закрытой корневой системой первой ротации в условиях Республиканского лесного селекционно-семеноводческого центра в апреле была обнаружена остановка в росте растений ели европейской, которая продолжалась в течение 3–4 недель и более. У растений сосны обыкновенной задержка в росте так явно, как у семян ели европейской, не наблюдалась.

Таким образом, для проведения исследования в условиях закрытой системы, приближенных к естественным условиям освещения Минской области для семян первой ротации, интерес представляет диапазон ФФО от 100 до $500 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$ с фотопериодом, равным 13 ч.

Для определения особенностей развития семян сосны и ели определялись сроки и скорости наступления фенологических фаз, среди которых выделялись следующие [17]: 1 – прорастание семян; 2 – появление всходов; 3 – развертывание семядолей; 4 – появление почки зачаточного побега; 5 – развертывания хвои; 6 – рост эпикотильной части стволика; 7 – переход в состояние покоя.

Семена сосны обыкновенной и ели европейской для проведения исследований были получены в Республиканском лесном селекционно-семеноводческом центре и характеризовались первым классом качества. Место сбора семян – центральная часть Республики Беларусь. Высев осуществлялся 15 марта 2022 г. в кассеты Plantek 100F с объемом ячейки 85 см^3 .

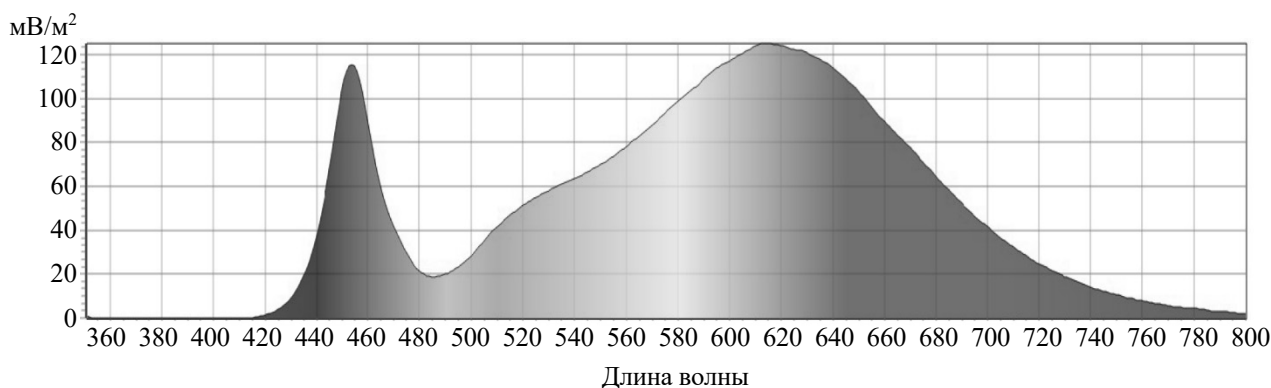


Рис. 1. Распределение облученности для секции № 1

Для заполнения кассет использовался субстрат, приготовленный согласно технологии, описанной в ТУ ВУ 100061961.002-2015 для сосны и ели.

С момента формирования настоящей хвои осуществлялась подкормка растений 0,5% раствором удобрения Кристалон особых.

Подкормка проводилась в объеме 10–12 мл на каждую ячейку с интервалом 1 неделя. По мере надобности осуществлялся полив в такой же дозировке. Контроль необходимости полива велся весовым методом.

Высеянные кассеты помещались в световой бокс из расчета одна кассета на одну секцию бокса.

Для создания необходимого уровня освещения в боксе использовались светодиодные светильники марки ДДП06-4x8-004 УХЛ4 Home Farm производства РНПУП «ЦСОТ НАН Беларуси». Они предназначены для использования в качестве источника ФАР при выращивании рассады, зеленных, лекарственных и декоративных растений в домашних условиях.

Светильники устанавливались таким образом, чтобы в первой секции обеспечивалась средняя фотонная облученность на уровне 100, во второй – 200 и в третьей 300 мкмоль/м²/с. Каждая секция бокса закрывалась с четырех сторон пластиковыми панелями белого цвета для обеспечения равномерного освещения.

Оценка общего уровня освещенности, а также спектральных характеристик светодиодных источников света проводилась с использованием спектрометра PAR PG200N.

Диаграмма распределения облученности в зависимости от длины волны представлена на рис. 1.

Спектральный состав излучения для всех трех секций идентичен. Значения фотонной облученности посева по основным диапазонам длины волны для каждой из секций в центральной области приведены в таблице.

В процессе проведения исследований в каждой секции учитывалось количество растений, достигших определенной фазы своего развития.

Динамика появления всходов представлена на рис. 2 и 3.

Появление единичных всходов началось на седьмой день как у сосны обыкновенной, так и у ели европейской.

Сравнение ФАР в зависимости от длины волны (мкмоль/м²/с)

Длина волны	Номер секции		
	1	2	3
PFD (общее)	106,8	220,0	312,5
PFD-B (400–500 нм)	50,6	104,9	147,7
PFD-G (500–600 нм)	34,6	71,1	101,4
PFD-R (600–700 нм)	13,1	26,4	38,7
PFD-FR (700–800 нм)	8,5	17,6	24,8

На восьмой день было уже четко видно заметное отставание по количеству появившихся проростков в секции с наименьшей интенсивностью освещения. Для сосны обыкновенной количество появившихся растений для среднего и высокого уровня интенсивности было примерно одинаковым, для ели более интенсивное освещение позволило повысить этот уровень на 5%.

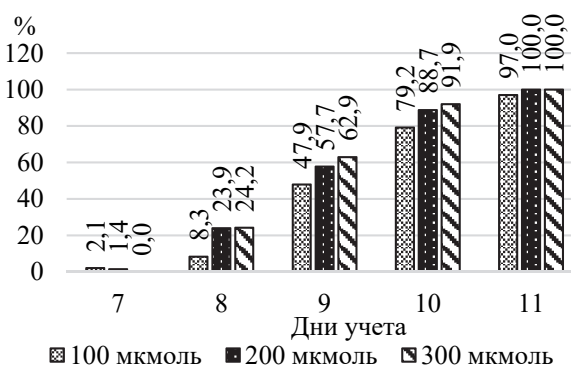


Рис. 2. Динамика появления всходов сосны обыкновенной

В дальнейшем для сосны обыкновенной более высокая скорость появления всходов была характерна для секции с большей интенсивностью потока фотонов. Для ели эта закономерность наблюдалась в первой половине периода

прорастания. Процесс появления всходов закончился на 11-й день для сосны обыкновенной и на 12-й день для ели европейской.

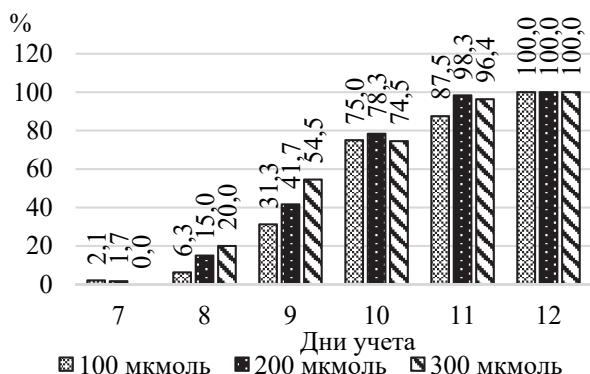


Рис. 3. Динамика появления всходов ели европейской

Динамика раскрытия семядолей представлена на рис. 4, 5.

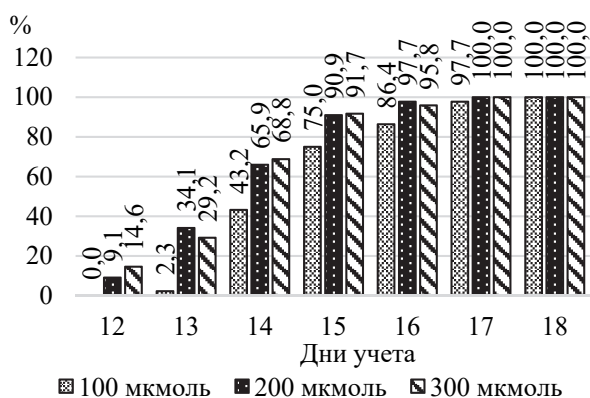


Рис. 4. Динамика раскрытия семядолей сосны обыкновенной

Для средней и высокой интенсивности освещения процесс раскрытия семядолей протекал практически одинаково у сосны обыкновенной. Для ели европейской увеличение степени освещенности вызвало ускорение процесса. Фактически интенсивность образования почки в случае высокой интенсивности освещения такая же, как

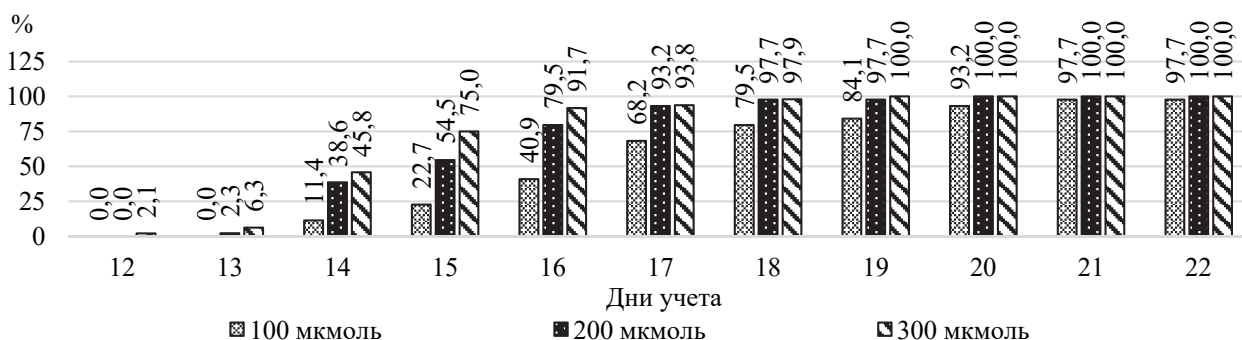


Рис. 6. Динамика появления почки зачаточного побега сосны обыкновенной

и для сосны, однако для средней и слабой интенсивности процесс продолжался до 23-го дня.

Окончание фазы раскрытия семядолей наступило на 17-й день как у сосны обыкновенной, так и у ели европейской.

Фаза появления почки зачаточного побега фактически начинает хвоевую стадию развития семян сосны и ели. С этого момента образуются зачатки настоящей хвои, которая интенсивно участвует в фотосинтетической активности.

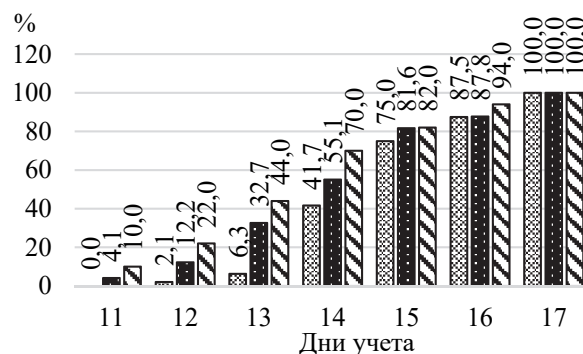


Рис. 5. Динамика раскрытия семядолей ели европейской

Первые почки зачаточного побега у сосны обыкновенной появились на 12-й день (рис. 6), а у ели европейской – на 13-й день (рис. 7). Причем интенсивность процесса появления почки зачаточного побега в значительной степени зависела от интенсивности освещения у сосны обыкновенной и в меньшей степени у ели европейской.

В первом случае максимальный уровень освещенности привел к увеличению скорости образования почек. Разница с минимальным уровнем составляла 2,2–4,0 раза. В результате фаза появления почки зачаточного побега для средней и высокой интенсивности практически закончилась на 19-й день, а для низкой интенсивности – только на 21-й день.

Для ели наблюдается такая же закономерность, однако разница в проценте появления почки зачаточного побега по вариантам опыта не настолько высокая.

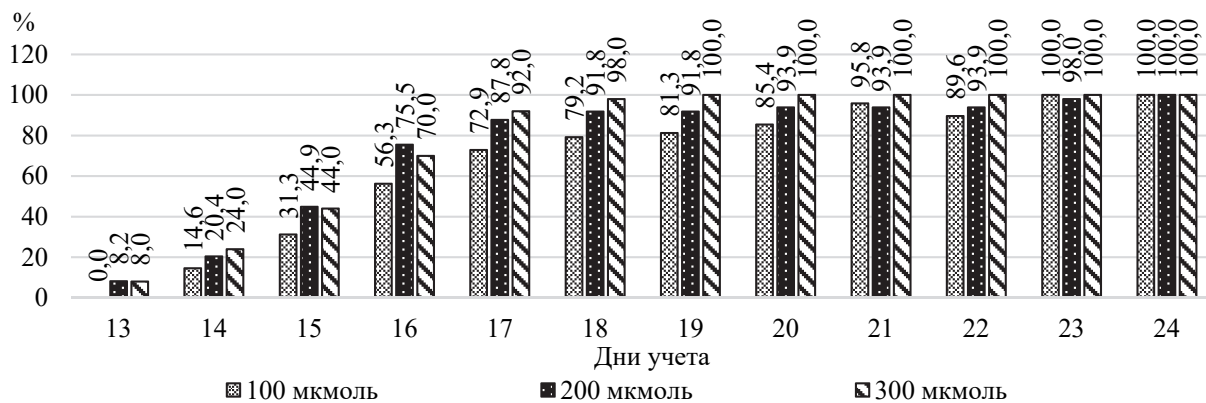


Рис. 7. Динамика появления почки зачаточного побега ели европейской

Фаза разворачивания настоящей хвои очень важна не только в физиологическом, но и технологическом аспекте. С момента появления настоящей хвои начинают формироваться боковые корни и сеянец переходит к автотрофному типу питания. Именно на эту фазу ориентируются специалисты при назначении даты начала подкормок, поскольку после достижения настоящей хвоей определенного размера

начинается рост эпикотилия и сеянца в высоту, что требует значительных объемов элементов питания.

Фаза разворачивания настоящей хвои у обеих пород протекает практически параллельно с образованием почки зачаточного побега. Отставание составляет один день как для сосны обыкновенной (рис. 8), так и для ели европейской (рис. 9).

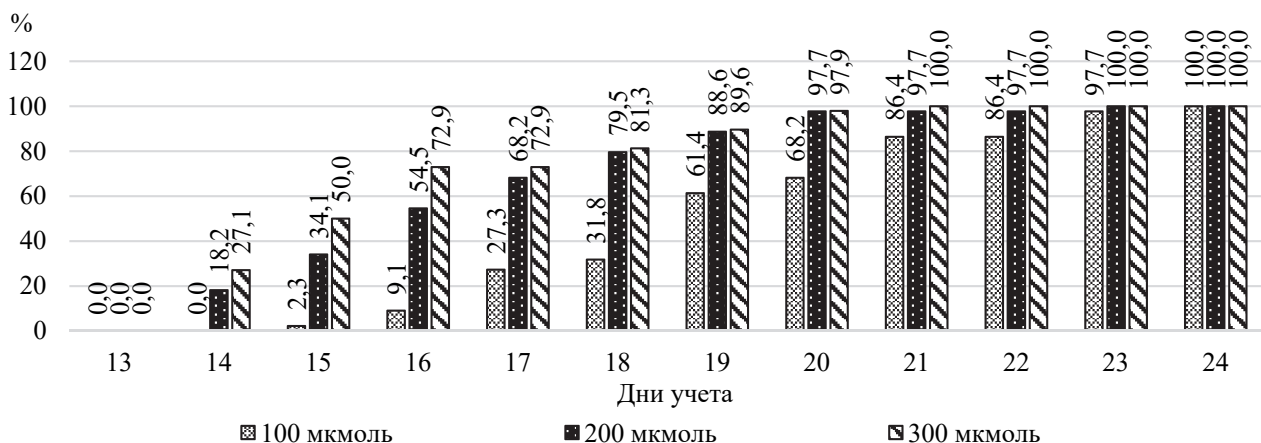


Рис. 8. Динамика разворачивания настоящей хвои сосны обыкновенной

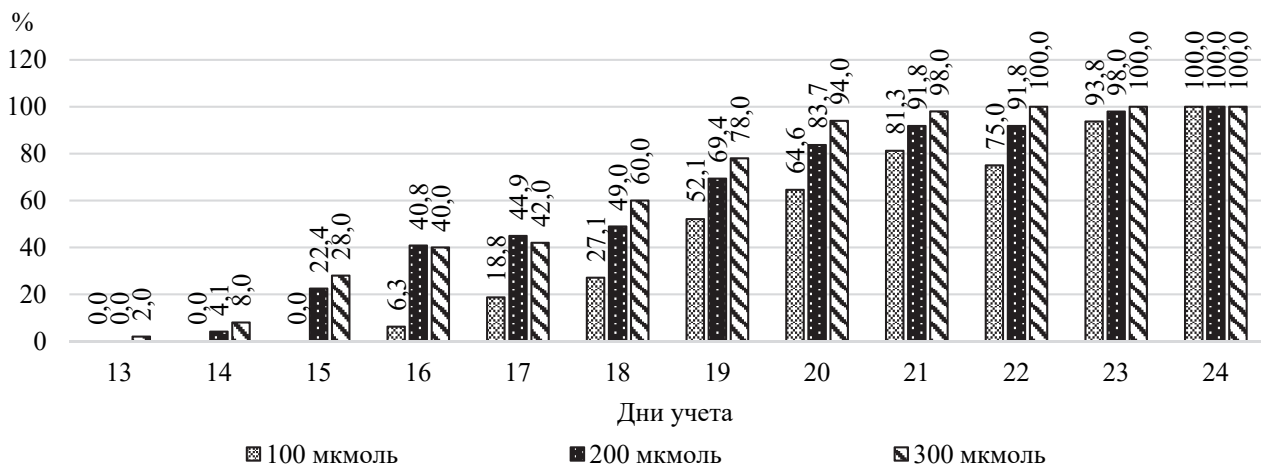


Рис. 9. Динамика разворачивания настоящей хвои ели европейской

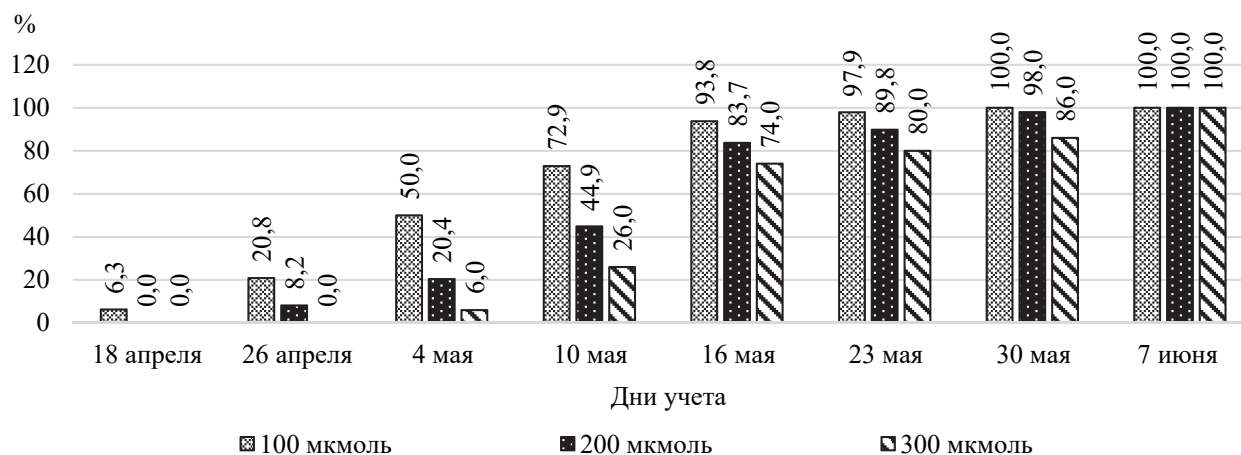


Рис. 10. Динамика образования верхушечных почек для ели европейской

Для обеих пород интенсивность развертывания настоящей хвои значительно выше при средней и высокой интенсивности освещения по сравнению с низкой.

При высокой интенсивности процесс развертывания хвои завершился на 21-й день для сосны и на 22-й день для ели. При средней интенсивности – на 23-й и 24-й день соответственно, при низкой – на 24-й день у обеих пород.

Наблюдение за ростовыми процессами показало, что до середины июня рост в высоту был незначительный у обеих пород. Кроме того, начиная с 18 апреля наблюдалось единичное формирование верхушечных почек, что фактически означает окончание фазы роста эпикотильной части стволика и переход растения в состояние покоя. Формирование верхушечной почки происходило вне зависимости от температуры, интенсивности подкормок и поливов и фактически было обусловлено продолжительностью фотопериода и количеством приходящей световой энергии. Причем характерно такое явление преимущественно для ели европейской. Сосна обыкновенная также начала закладывать верхушечные почки, однако этот процесс начался практически на месяц позже.

Динамика образования спящих почек для ели европейской приведена на рис. 10.

Как показано на рис. 10, наиболее интенсивно этот процесс протекал в секции с минимальной интенсивностью освещения. В этом варианте все растения заложили верхушечную почку фактически в течение 35 дней. Для наиболее освещенных растений данный процесс длился почти 50 дней. Освещенность в 221 мкмоль/м²/с занимает промежуточное положение.

Поскольку образование почек тормозило ростовые процессы, было принято решение увеличить продолжительность фотопериода до 14 ч, что было выполнено 17.06.2022. В результате практически через месяц высота семян сосны

обыкновенной, большинство из растений которой только начало закладывать верхушечные почки, увеличилась на 67% для первой секции, на 57,5% для второй и 43,4% для третьей. Для теневыносливой ели европейской увеличение периода не оказало такого сильного воздействия на прирост в высоту. Наиболее высокий прирост (28,4%) наблюдался в наиболее освещенной секции, наименьший прирост был характерен для секции с наименьшей интенсивностью освещения и составил 5,2%. В результате явная прямая зависимость высоты семян от интенсивности освещения, наблюдаемая в апреле, мае и июне, стала практически незаметной в июле.

Заключение. По степени влияния интенсивности освещения на формирование проростков, развертывание семядолей, образование почки зачаточного побега и развертывание настоящей хвои при уровне фотонной облученности 100 мкмоль/м²/с получены минимальные результаты. Отставание в сроках наступления фаз составляет 1–3 дня. При фотонной облученности в 200 и 300 мкмоль/м²/с получены сопоставимые результаты. С учетом меньшего потребления энергии уровень фотонной облученности 200 мкмоль/м²/с можно считать оптимальным значением для данных фаз развития и использовать его для выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой в условиях светодиодного освещения.

Продолжительность фотопериода 13 ч лимитирует ростовые процессы сосны обыкновенной и ели европейской и вызывает закладку верхушечной почки практически через 1 месяц после посева у ели европейской и 1,5–2 месяца у сосны обыкновенной. Увеличение продолжительности фотопериода на 1 ч стимулирует рост семян в высоту, однако у успевшей заложить верхушечные почки ели европейской интенсивность ростовых процессов была значительно ниже по сравнению с сосной обыкновенной.

Список литературы

1. Razzak M. D. Physiological changes in response to light intensity and R:FR ratio in Scots pine (*Pinus sylvestris*) // *Plant, cell & environment*. 2017. No. 40. P. 1–9.
2. Pallardy Stephen G. *Physiology of woody plants*. Academic Press, 2008. 469 p.
3. Ginkgo biloba retains functions of both type I and type II flowering plant phytochrome / S. Christensen [et al.] // *Plant and Cell Physiology*. 2002. No. 43. P. 768–777.
4. Sugiura D., Kojima M., Sakakibara H. Phytohormonal Regulation of Biomass Allocation and Morphological and Physiological Traits of Leaves in Response to Environmental Changes in *Polygonum cuspidatum* // *Front Plant Sci.*, 2016. No. 7. P. 1189.
5. Мешик О. П. Оценка гелиоэнергетических ресурсов климата Беларуси // *Вестн. Брест. гос. техн. ун-та Серия: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология*. 2020. № 2. С. 93–99.
6. Разработка концепции и конструкторской документации системы досветки как технологической части проекта комплекса для экспериментальной площадки комплекса: отчет о НИР (заключ.) / Центр светодиод. и оптоэлектрон. технологий Нац. акад. наук Беларуси; рук. М. И. Баркун. Минск, 2021. 189 с.
7. Velasco M., Mattsson A. Light quality and intensity of light-emitting diodes during pre-cultivation of *Picea abies* (L.) Karst. and *Pinus sylvestris* L. seedlings – impact on growth performance, seedling quality and energy consumption // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2019. No. 34:3. P. 159–177.
8. Bantis F., Radoglou K. Morphology, development, and transplant potential of *Prunus avium* and *Cornus sanguinea* seedlings growing under different LED lights // *Turkish Journal of Biology*. 2017. No. 2 (41). P. 314–321.
9. Growth and Physiological Responses of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst) Supplemented with Monochromatic Red, Blue and Far-Red Light / F. OuYang [et al.] // *Forests*. 2021. No. 12 (164). URL: <https://www.mdpi.com/1999-4907/12/2/164> (date of access: 10.09.2022).
10. Influence of Light of Different Spectral Compositions on the Growth, Photosynthesis, and Expression of Light-Dependent Genes of Scots Pine Seedlings / P. Pashkovskiy [et al.] // *Cells*. 2021. No. 10 (12):3284. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8699472/> (date of access: 10.09.2022).
11. Cooke J. E. K., Eriksson M. E., Junttila O. The dynamic nature of bud dormancy in trees: environmental control and molecular mechanisms // *Plant Cell Environ.* 2012. No. 35. P. 1707–1728.
12. The joint influence of photoperiod and temperature during growth cessation and development of dormancy in white spruce (*Picea glauca*) / Jill A. Hamilton [et al.] // *Tree Physiology*. 2016. Vol. 36, issue 11. P. 1432–1448. DOI: 10.1093/treephys/tpw061.
13. Ekberg Inger, Gösta Eriksson. Photoperiodic Reactions in Conifer Species // *Holarctic Ecology*. 1979. Vol. 2, no. 4. P. 255–263. URL: <http://www.jstor.org/stable/3682420> (date of access: 07.03.2023).
14. Short-day photoperiods affect expression of genes related to dormancy and freezing tolerance in Norway spruce seedlings / E. Wallin [et al.] // *Annals of Forest Science*. 2017. Vol. 74, no. 59. DOI: 10.1007/s13595-017-0655-9.
15. Interactive Effects of Light Quality during Day Extension and Temperature on Bud Set, Bud Burst and PaFTL2, PaCOL1-2 and PaSOC1 Expression in Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) / C. Chiang [et al.] // *Forests*. 2021. Vol. 12, no. 3. P. 337.
16. Крамер П. Д., Козловский Т. Т. Физиология древесных растений. М.: Лесная пром-сть, 1983. 462 с.
17. Редько Г. И., Огиевский Д. В., Романов Е. М. Биозэкологические основы выращивания сеянцев сосны и ели в питомниках. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 62 с.

References

1. Razzak M. D. Physiological changes in response to light intensity and R:FR ratio in Scots pine (*Pinus sylvestris*). *Plant, cell & environment*, 2017, no. 40, pp. 1–9.
2. Pallardy Stephen G. *Physiology of woody plants*. Academic Press, 2008, pp. 469.
3. Christensen S., LaVerne E., Boyd G., Silverthorne J. Ginkgo biloba retains functions of both type I and type II flowering plant phytochrome. *Plant and Cell Physiology*, 2002, no. 43, pp. 768–777.
4. Sugiura D., Kojima M., Sakakibara H. Phytohormonal Regulation of Biomass Allocation and Morphological and Physiological Traits of Leaves in Response to Environmental Changes in *Polygonum cuspidatum*. *Front Plant Sci.*, 2016, no. 7, p.1189.

5. Meshik O. P. Evaluation of solar energy resources of the climate of Belarus. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Brest State Technical University], series: Water Construction, Thermal Power Engineering and Geoecology, 2020, no. 2, pp. 93–99 (In Russian).

6. *Razrabotka kontseptsii i konstruktorskoj dokumentatsii sistemy dosvetki kak tekhnologicheskoy chasti proyekta kompleksa dlya eksperimental'noy ploshchadki kompleksa: otchet o NIR (zaklyuchitel'nyy)*. [Development of the concept and design documentation of the lighting system as a technological part of the project of the complex for the experimental site of the complex: Research report (final)]. Minsk, 2021. 189 p. (In Russian).

7. Velasco M., Mattsson A. Light quality and intensity of light-emitting diodes during pre-cultivation of *Picea abies* (L.) Karst. and *Pinus sylvestris* L. seedlings – impact on growth performance, seedling quality and energy consumption. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2019, no. 34:3, pp. 159–177.

8. Bantis F., Radoglou K. Morphology, development, and transplant potential of *Prunus avium* and *Cornus sanguinea* seedlings growing under different LED lights. *Turkish Journal of Biology*, 2017, no. 2 (41), pp. 314–321.

9. OuYang F., Ou Y., Zhu T., Ma J., An S., Zhao J., Wang J., Kong L., Zhang H., Tigabu M. Growth and Physiological Responses of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst) Supplemented with Monochromatic Red, Blue and Far-Red Light. *Forests*, 2021, no. 12 (164). Available at: <https://www.mdpi.com/1999-4907/12/2/164> (accessed 10.09.2022).

10. Pashkovskiy P., Kreslavski V. D., Ivanov Y., Ivanova A., Kartashov A. Influence of Light of Different Spectral Compositions on the Growth, Photosynthesis, and Expression of Light-Dependent Genes of Scots Pine Seedlings. *Cells*, 2021, no. 10 (12):3284. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8699472/> (accessed 10.09.2022).

11. Cooke J. E. K., Eriksson M. E., Junttila O. The dynamic nature of bud dormancy in trees: environmental control and molecular mechanisms. *Plant Cell Environ*, 2012, no. 35, pp. 1707–1728.

12. Jill A. Hamilton, Walid El. Kayal, Ashley T. Hart, Daniel E. Runcie, Adriana Arango-Velez, Janice E. K. Cooke. The joint influence of photoperiod and temperature during growth cessation and development of dormancy in white spruce (*Picea glauca*). *Tree Physiology*, 2016, vol. 36, issue 11, pp. 1432–1448. DOI: 10.1093/treephys/tpw061.

13. Ekberg Inger, Gösta Eriksson. Photoperiodic Reactions in Conifer Species. *Holarctic Ecology*, 1979, vol. 2, no. 4, pp. 255–263. Available at: <http://www.jstor.org/stable/3682420> (accessed 07.03. 2023).

14. Wallin E., Gräns D., Jacobs D. F. Short-day photoperiods affect expression of genes related to dormancy and freezing tolerance in Norway spruce seedlings. *Annals of Forest Science*, 2017, vol. 74, no. 59. DOI: 10.1007/s13595-017-0655-9.

15. Chiang C., Aas O. T., Viejo M. Interactive Effects of Light Quality during Day Extension and Temperature on Bud Set, Bud Burst and PaFTL2, PaCOL1-2 and PaSOC1 Expression in Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Forests*, 2021, vol. 12, no. 3, p. 337.

16. Kramer P. D., Kozlovskiy T. T. *Fiziologiya drevesnykh rasteniy* [Physiology of woody plants]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 462 p. (In Russian).

17. Red'ko G. I., Ogievskiy D. V., Romanov E. M. *Bioekologicheskiye osnovy vyrashchivaniya seyantsev sosny i yeli v pitomnikakh* [Bioecological bases of growing pine and spruce seedlings in nurseries]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 62 p. (In Russian).

Информация об авторах

Носников Вадим Валерьевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: nosnikov@belstu.by

Босовец Мария Михайловна – инженер кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: mariaice10062000@gmail.com

Селищева Оксана Александровна – кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: oksana_selishchava@mail.ru

Баркун Михаил Иосифович – ведущий инженер. Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси (220090, г. Минск, Логойский тракт, 20, Республика Беларусь). E-mail: m_barkun@ledcenter.by

Information about the authors

Nosnikov Vadim Valer'evich – 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: nosnikov@belstu.by

Bosovets Maria Mikhailovna – engineer, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mariaice10062000@gmail.com

Selishcheva Oksana Aleksandrovna – PhD (Agriculture), Senior Lecturer, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: oksana_selishchava@mail.ru

Barkun Mikhail Iosifovich – leading engineer. Center of LED and Optoelectronic Technologies of the National Academy of Sciences of Belarus (20, Logoisky Trakt, 220090, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: m_barkun@ledcenter.by

Поступила 15.03.2023

УДК 630*232.315.3

В. В. Носников¹, А. А. Овсей², В. Э. Мишина³, А. В. Потапова³¹Белорусский государственный технологический университет²Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь³Республиканский лесной селекционно-семеноводческий центр**ОЦЕНКА ПРИЕМОМ ПОВЫШЕНИЯ ГРУНТОВОЙ ВСХОЖЕСТИ ЖЕЛУДЕЙ
И ВЫХОДА ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО
С ЗАКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ**

При выращивании сеянцев дуба черешчатого с закрытой корневой системой необходимо обеспечить высокую грунтовую всхожесть, что может достигаться сортировкой желудей, оптимизацией условий их хранения и подготовки к посеву. В статье приведены результаты оценки влияния способов хранения, сроков посева желудей, их обрезки и состава субстрата на грунтовую всхожесть и размерные показатели сеянцев дуба. При сравнении методов хранения желудей в траншеях и холодильных камерах выявлено незначительное преимущество первого метода. Усредненное значение всхожести желудей при высеве в мае составило 48,5% при хранении в траншее и 45,9% при хранении в холодильной камере, при высеве в июне 53,8 и 52,2% соответственно. Влияния на размерные показатели отмечено не было. Введение в состав субстрата дополнительного количества удобрений и доломитовой муки может способствовать увеличению биометрических показателей сеянцев. Использование обрезки желудей повышает грунтовую всхожесть в 2,0–2,4 раза. При повышении интенсивности обрезки повышается грунтовая всхожесть, но снижается размер посадочного материала. Посев обрезанных желудей в конце июля позволяет выращивать стандартный материал при условии нахождения его в теплице до момента закалки.

Ключевые слова: дуб черешчатый, желуди, подготовка предпосевная, посев, кассеты.

Для цитирования: Носников В. В., Овсей А. А., Мишина В. Э., Потапова А. В. Оценка приемов повышения грунтовой всхожести желудей и выхода посадочного материала дуба черешчатого с закрытой корневой системой // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 46–53. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-6.

V. V. Nosnikov¹, A. A. Ovsey², V. E. Mishina³, A. V. Potapova³¹Belarusian State Technological University²Ministry of Forestry of the Republic of Belarus³Republican breeding and seed production center**EVALUATION OF THE METHODS OF INCREASING
THE GROUND GERMINATION OF ACORNS AND THE YIELD
OF CONTAINER PLANTING MATERIAL OF ENGLISH OAK**

When growing container planting material of English oak, it is necessary to ensure high soil germination, which can be achieved by sorting seed material, optimizing its storage conditions and preparing acorns for sowing. The article presents the results of assessing the influence of storage methods, the timing of sowing acorns, their pruning and the composition of the substrate on soil germination and dimensional indicators of container oak seedlings. When comparing the methods of storing acorns in trenches and barrels in cold stores, a slight advantage of the first method was revealed. The average value of germination for storage in a trench was 48.5%, for storage in a refrigerator 45.9% when sown in May, 53.8 and 52.2%, respectively, when sown in June. There was no effect on dimensional indicators. The introduction of an additional amount of fertilizers and dolomite into the composition of the substrate can contribute to an increase in the biometric parameters of seedlings. The use of pruning acorns increases soil germination within 2.0–2.4 times. With an increase in the intensity of pruning, soil germination increases, but the size of planting material decreases. Sowing cropped acorns at the end of July allows to grow standard material, provided it is in a greenhouse until hardening.

Keywords: English oak, acorns, pre-sowing preparation, sowing, trays.

For citation: Nosnikov V. V., Ovsey A. A., Mishina V. E., Potapova A. V. Evaluation of the methods of increasing the ground germination of acorns and the yield of container planting material of English oak. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 46–53. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-6 (In Russian).

Введение. Дуб черешчатый (*Quercus robur*) является одной из наиболее важных лесных пород Беларуси как в хозяйственном, так и в экологическом плане.

Стратегические задачи по увеличению доли участия лесных насаждений твердолиственных пород, поставленные перед лесным хозяйством республики [1], требуют совершенствования технологических подходов к созданию и выращиванию дубрав. Одним из направлений реализации стратегической задачи является развитие искусственного восстановления дуба через развитие методов лесного семеноводства, выращивания лесного посадочного материала и создания лесных культур этой породы [2].

Использование посадочного материала с закрытой корневой системой (ЗКС) является одним из эффективных путей восстановления насаждений твердолиственных пород [3, 4]. Однако технологический процесс получения такого посадочного материала имеет определенные особенности, отличающие его от процесса выращивания семян с ЗКС хвойных пород.

Во-первых, особенности формирования корневых систем дуба черешчатого в контейнерах приводят к неравномерному распределению корней в ячейке, что делает важным вопрос подбора характеристик кассет для выращивания посадочного материала данной породы [5–7].

Во-вторых, производство семян дуба черешчатого в контейнерах требует одновременного прорастания и появления всходов. Разница между прорастанием первых и последних желудей может достигать нескольких недель [8]. В результате у ранее появившихся растений быстро формируются листья, которые затеяют соседние семена и ограничивают доступ к воде и элементам питания при подкормках [9]. Соответственно, стоит вопрос как в ускорении процесса прорастания желудей, так и в повышении их грунтовой всхожести, что ведет к повышению выхода стандартного посадочного материала и его равномерности по биометрическим показателям.

Основная часть. Основными агротехническими приемами, направленными на решение проблемных вопросов со всхожестью желудей, является их сортировка, предпосевная подготовка, а также срок посева в кассеты.

При сортировке небольшие желуди обычно отбраковывают, поскольку они снижают качество выращиваемых растений. Однако потенциально их удаление может снизить генетическое разнообразие лесных культур. В то же время использование небольших желудей приведет к отставанию в росте посадочного материала дуба на начальной стадии развития и дальнейшему угнетению в процессе выращивания, в результате

чего произойдет снижение выхода стандартного посадочного материала.

Согласно проведенным исследованиям [10, 11], посадочный материал, выросший из мелких желудей, имел значительно меньшие показатели по высоте, диаметру у корневой шейки и массе корневой системы.

Кроме того, такие семена отличались приживаемостью на 32% меньшей, чем у посадочного материала, выросшего из средних и крупных желудей.

Поэтому сортировка желудей должна являться обязательной операцией при выращивании посадочного материала дуба черешчатого с закрытой корневой системой.

На грунтовую всхожесть дуба черешчатого существенное влияние оказывает качество семенного материала. Простым способом отделения поврежденных желудей от здоровых является метод флотации, или жидкостной сепарации, которая становится обязательным элементом технологии выращивания посадочного материала дуба черешчатого [12, 13]. Причем проводиться она должна до момента закладки желудей на хранение.

Кроме того, перед закладкой желудей на хранение необходимо убрать поверхностное заражение патогенными грибами, для чего используется протравливание семян или гидротермическая обработка, которая также уже является стандартной операцией при закладке желудей на хранение [14].

Дуб не относится к породам с длительным сроком хранения, который обычно не превышает 2–3 года [15, 16], поэтому важным вопросом является сохранение всхожести желудей в процессе их хранения, что обеспечивает выбор его оптимального способа.

Одним из значимых направлений повышения грунтовой всхожести является предпосевная обработка желудей. Например, замачивание желудей в микробных препаратах. Результаты исследования показали, что применение таких микробных препаратов, как «Гордебак», «Бактопин» и «Фрутин», повышает грунтовую всхожесть желудей на 16–18% по сравнению с контролем [17].

Достаточно распространенным способом предпосевной подготовки является обрезка желудей, что позволяет ускорить их прорастание благодаря более быстрому насыщению водой и повысить грунтовую всхожесть за счет отбраковки желудей с видимыми при обрезке внутренними повреждениями. В результате всхожесть может повыситься на 17% [18]. Ключевым моментом при использовании данной технологии является определение степени обрезания желудей, поскольку она напрямую влияет на рост и развитие семян дуба черешчатого [18, 19].

Для отработки отдельных элементов технологии хранения и предпосевной подготовки семян при выращивании посадочного материала с ЗКС дуба черешчатого на базе Республиканского лесного селекционно-семеноводческого центра (РЛССЦ) был заложен эксперимент, для чего использовались желуди дуба черешчатого II класса качества, которые были заготовлены в Глубокском лесничестве Глубокского опытного лесхоза и Ратомском лесничестве Боровлянского спецлесхоза в 2021 г. и до постановки эксперимента хранились в холодильных камерах РЛССЦ.

Для определения влияния условий хранения желудей на их прорастание было использовано несколько вариантов опыта. В первом варианте желуди в количестве 15 кг помещались в бочку емкостью 20 л. На дно засыпали опилки толщиной 5 см. По центру бочки на всю ее высоту был установлен вентиляционный воздуховод, выполненный из пластиковой перфорированной дренажной трубы диаметром 63 мм. При закрытии бочки крышкой желуди накрывались мешковиной для уменьшения потерь воды и дополнительной вентиляции. Подготовленные бочки помещались в холодильную камеру с температурой $0 \pm 2^\circ\text{C}$.

Второй вариант предусматривал хранение в траншее. Для этого на сухом возвышенном месте была подготовлена траншея глубиной 1 м. Желуди в траншею закладывались при наступлении устойчивых заморозков (температура $-1-3^\circ\text{C}$). Их засыпали в яму, перемешивая со свежим песком. Верхний (последний) слой желудей располагался на 80 см ниже кромки траншеи. Далее засыпали грунтом, сверху насыпали холм земли 50 см высотой, перекрывающий крайки ямы.

После окончания хранения желуди дуба черешчатого были высеяны в различные субстраты, которые включали различные варианты по кислотности применяемых удобрений и виду кассет. Высев производился в мае, июне, июле 2022 г. с целью оценить биометрические показатели посадочного материала при моделировании посевов различных ротаций.

Для закладки опытных посевов дуба черешчатого в тепличном комплексе РЛССЦ в мае 2022 г. использовались следующие варианты субстратов:

1) контроль: торф верховой с 5%-ным содержанием агроперлита (кассета F35);

2) субстрат торфяно-перлитный ТУ (кассета F35);

3) торф верховой с 5%-ным содержанием агроперлита и 2 г/л доломитовой муки (кассета F35);

4) торф верховой с 5%-ным содержанием агроперлита и 3 г/л доломитовой муки (кассета F35);

5) торф верховой с 5%-ным содержанием агроперлита и 4 г/л доломитовой муки (кассета F35);

6) торф верховой с 5%-ным содержанием агроперлита и 2 г/л удобрения «Осмокот Экзакт Мини, 5–6 М» (кассета F35);

7) торф верховой с 5%-ным содержанием агроперлита и 3 г/л удобрения «Осмокот Экзакт Мини, 5–6 М» (кассета F35);

8) торф верховой с 5%-ным содержанием агроперлита и 0,8 кг/м³ удобрения КМУС-1 (кассета F35);

9) торф верховой с 5%-ным содержанием агроперлита и 1,0 кг/м³ удобрения КМУС-1 (кассета F35);

10) торф верховой с 5%-ным содержанием агроперлита и 1,2 кг/м³ удобрения КМУС-1 (кассета F35);

11) субстрат торфяно-перлитный ТУ (кассета F64);

12) субстрат торфяно-перлитный ТУ (кассета FD64).

В июне 2022 г. желуди дуба черешчатого были высеяны в кассеты по следующей схеме:

1) субстрат торфяно-перлитный ТУ (кассета F35);

2) субстрат торфяно-перлитный ТУ и 3 г/л доломитовой муки (кассета F35);

3) субстрат торфяно-перлитный ТУ и 1,0 кг/м³ удобрения КМУС-1 (кассета F35);

4) торф верховой с 5%-ным содержанием агроперлита и 1,0 кг/м³ удобрения КМУС-1 (кассета F35).

Для посева использовались кассеты Plantek 35F, Plantek 64F и Plantek 64FD.

В зависимости от вариантов опыта была определена всхожесть желудей в кассетах.

Результаты исследований всхожести желудей, высеянных 11 мая 2022 г., представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Всхожесть желудей дуба черешчатого
(высев 11.05.2022)**

Вариант субстрата	Вариант опыта	Всхожесть, %
Кассета F35		
1	Траншея	57,1
	Холодильная камера	44,3
2	Траншея	45,7
	Холодильная камера	44,3
3	Траншея	48,6
	Холодильная камера	51,4
4	Траншея	48,6
	Холодильная камера	45,7
5	Траншея	60,0
	Холодильная камера	42,9
6	Траншея	48,6
	Холодильная камера	51,4

Окончание табл. 1

Вариант субстрата	Вариант опыта	Всхожесть, %
7	Траншея	45,7
	Холодильная камера	45,2
8	Траншея	47,1
	Холодильная камера	45,3
9	Траншея	48,6
	Холодильная камера	41,4
10	Траншея	41,7
	Холодильная камера	46,8
Кассета F64		
11	Траншея	40,6
	Холодильная камера	48,4
Кассета FD64		
12	Траншея	50
	Холодильная камера	44,4

Таблица 2

**Всхожесть желудей дуба черешчатого
(высев 02.06.2022)**

Вариант субстрата	Вариант опыта	Всхожесть, %
Кассета F35		
1	Траншея	47,6
	Холодильная камера	46,4
2	Траншея	58,4
	Холодильная камера	60,0
3	Траншея	60,0
	Холодильная камера	57,6
4	Траншея	49,2
	Холодильная камера	44,6

В ноябре была проведена оценка высоты надземной части и толщины стволика у корневой шейки (табл. 3).

Наиболее высокие значения как по высоте надземной части, так и по толщине стволика у корневой шейки показал вариант с внесением 1,2 кг/м³ удобрения КМУС-1. Также высокие показатели были характерны для удобрения «Осмокот Экзакт Мини, 5–6 М» и для субстрата, приготовленного согласно ТУ.

Минимальное значение соответствовало варианту с использованием чистого верхового торфа. Также низкие значения были характерны для вариантов с добавлением в торф только доломитовой муки в различных дозировках. По всем вариантам опыта наблюдалось снижение биометрических показателей сеянцев у варианта с хранением в холодильной камере по сравнению с хранением желудей в траншее. Результаты замера высоты и диаметра сеянцев дуба черешчатого июньского высева приведены в табл. 4.

Таблица 3

**Биометрические параметры сеянцев
дуба черешчатого (высев 11.05.2022)**

Вариант субстрата	Вариант опыта	Средняя высота, см	Средний диаметр, мм
Кассета F35			
1	Траншея	13,58 ± 0,49	4,18 ± 0,14
	Холод. камера	11,07 ± 0,63	3,03 ± 0,14
2	Траншея	20,96 ± 0,40	4,23 ± 0,08
	Холод. камера	15,16 ± 0,54	3,21 ± 0,09
3	Траншея	15,73 ± 0,72	4,11 ± 0,16
	Холод. камера	12,41 ± 0,46	2,43 ± 0,09
4	Траншея	13,41 ± 0,46	3,74 ± 0,12
	Холод. камера	12,16 ± 0,31	3,30 ± 0,12
5	Траншея	13,76 ± 0,54	3,60 ± 0,11
	Холод. камера	11,06 ± 0,39	3,45 ± 0,11
6	Траншея	19,08 ± 0,65	3,72 ± 0,12
	Холод. камера	17,97 ± 0,88	3,04 ± 0,11
7	Траншея	20,59 ± 0,94	4,26 ± 0,19
	Холод. камера	21,63 ± 1,50	3,48 ± 0,22
8	Траншея	17,09 ± 0,62	3,94 ± 0,12
	Холод. камера	12,46 ± 0,96	2,91 ± 0,13
9	Траншея	21,10 ± 1,35	4,38 ± 0,19
	Холод. камера	15,25 ± 0,81	3,44 ± 0,14
10	Траншея	23,22 ± 1,25	4,44 ± 0,17
	Холод. камера	12,59 ± 0,69	3,33 ± 0,18
Кассета F64			
11	Траншея	16,07 ± 0,53	3,17 ± 0,14
	Холод. камера	14,96 ± 0,32	3,56 ± 0,09
Кассета FD64			
12	Траншея	18,63 ± 0,41	3,79 ± 0,11
	Холод. камера	13,94 ± 0,33	3,19 ± 0,07

Таблица 4

**Биометрические параметры сеянцев
дуба черешчатого (высев 02.06.2022)**

Вариант субстрата	Вариант опыта	Средняя высота, см	Средний диаметр, мм
Кассета F35			
1	Траншея	16,34 ± 0,97	3,78 ± 0,15
	Холод. камера	16,01 ± 0,95	3,27 ± 0,18
2	Траншея	23,35 ± 1,58	3,98 ± 0,16
	Холод. камера	20,32 ± 0,97	3,46 ± 0,14
3	Траншея	23,67 ± 0,99	4,19 ± 0,13
	Холод. камера	22,27 ± 1,18	3,68 ± 0,12
4	Траншея	12,56 ± 0,41	3,45 ± 0,09
	Холод. камера	16,37 ± 0,65	3,42 ± 0,17

Наиболее высокими показателями отличался вариант с добавлением в субстрат, приготовленный согласно ТУ, удобрения КМУС-1 с дозой внесения 1,0 кг/м³, обеспечивающим дополнительное питание растений. При этом показатели высоты надземной части и диаметра стволика у корневой шейки соответствуют вариантам опыта, высеянными в мае.

Таблица 5

Показатели желудей крупной фракции перед обрезкой и после нее

Вариант обрезки								
До 15–20% (1/5)			До 25% (1/4)			До 30% (1/3)		
Средняя масса до обрезки, г	Средняя длина до обрезки, мм	Средняя масса после обрезки, г	Средняя масса до обрезки, г	Средняя длина до обрезки, мм	Средняя масса после обрезки, г	Средняя масса до обрезки, г	Средняя длина до обрезки, мм	Средняя масса после обрезки, г
6,89 ± 0,14	34,03 ± 0,45	5,93 ± 0,11	6,87 ± 0,13	33,34 ± 0,39	5,53 ± 0,11	6,25 ± 0,11	32,93 ± 0,35	4,03 ± 0,10

Для определения влияния обрезки желудей на всхожесть и биометрические показатели семян дуба первоначально проводили сортировку семенного материала с разделением по размерным показателям на три фракции.

Мелкие желуди удалялись. Затем у желудей средней и крупной фракции уменьшали длину со стороны шляпки на 1/5, 1/3 и 1/4 при помощи секатора. Состояние желудей оценивали визуально по степени потемнения эндосперма и наличию повреждений энтомологическими вредителями. Желуди с видимыми повреждениями отбраковывали.

Показатели анализируемых желудей для крупной фракции представлены в табл. 5. В качестве контроля использовали необрезанные желуди.

Желуди, у которых производилось укорачивание длины, были высеваны вручную в кассеты Plantek F35 в конце июня 2022 г. Желуди укладывали на место посева горизонтально и углубляли в субстрат на 0,5 см. В опыте использовали субстрат торфяно-перлитный ТУ с добавлением 3 г/л доломитовой муки.

Результаты определения всхожести желудей в зависимости от степени обрезки представлены в табл. 6.

Таблица 6

Всхожесть желудей дуба черешчатого после обрезки (высев 23.06.2022)

Фракция	Вариант опыта	Всхожесть, %
Средние	Контроль	40
	1/3	94,3
	1/4	89,5
	1/5	81
Крупные	Контроль	36,2
	1/3	89,5
	1/4	87,6
	1/5	85,7

Всхожесть обрезанных желудей значительно превосходила всхожесть как контрольного варианта, так и опытных посевов мая и июня. Для фракции средних желудей это превышение было в пределах 2,0–2,4 раза, для фракции крупных – 2,4–2,5 раза. При этом максимальную

всхожесть вне зависимости от фракции показали варианты с максимальной обрезкой.

Такая ситуация объясняется тем, что при проведении интенсивной обрезки в большей степени возможно выявить поврежденные семена и исключить их из высева.

Результаты определения средней высоты надземной части и диаметра стволика приведены в табл. 7.

Таблица 7

Биометрические показатели семян дуба черешчатого после обрезки (высев 23.06.2022)

Фракция	Вариант опыта	Средняя высота, см	Средний диаметр, мм
Средние	Контроль	16,71 ± 0,70	3,19 ± 0,13
	1/3	14,29 ± 0,57	3,35 ± 0,12
	1/4	18,02 ± 0,49	3,54 ± 0,09
	1/5	19,11 ± 0,58	3,73 ± 0,08
Крупные	Контроль	18,77 ± 1,19	3,74 ± 0,17
	1/3	16,94 ± 0,60	3,77 ± 0,09
	1/4	21,33 ± 0,72	4,01 ± 0,09
	1/5	22,11 ± 0,86	4,05 ± 0,11

По результатам эксперимента можно проследить взаимосвязь между величиной обрезки желудей и их биометрическими показателями: чем больше обрезается желудь, тем меньших размеров достигает посадочный материал, так как с обрезкой происходит уменьшение количества эндосперма, содержащего питательные вещества, необходимые для полноценного развития растения на начальном этапе роста. В варианте с удалением трети желудя сеянцы дуба для обеих фракций крупности имели значение высоты надземной части меньше, чем растения контрольного варианта. Все остальные размеры обрезки оказали стимулирующее действие как на высоту, так и на диаметр сеянцев. Максимальное значение характерно для варианта с минимальной обрезкой. Удаление четверти желудя показало незначительно меньшие результаты.

При выращивании посадочного материала с закрытой корневой системой очень важно обеспечить выращивание сеянцев в каждой ячейке, поэтому предъявляются высокие требования к всхожести используемых семян. С этой точки

зрения предпочтительнее использовать обрезку желудей на треть.

В то же время этот вариант показывает наихудшие размерные показатели посадочного материала. Соответственно, компромиссным решением является обрезка желудей на 1/4 их длины.

Для подтверждения положительного воздействия обрезки в июле 2022 г. был заложен эксперимент с использованием следующих видов субстратов:

1) субстрат торфяно-перлитный ТУ (кассета F35);

2) субстрат торфяно-перлитный ТУ и 3 г/л доломитовой муки (кассета F35);

3) торф верховой с 5%-ным содержанием агроперлита и 3 кг/м³ удобрения «Осмокот Экзакт Мини, 5–6 М» (кассета F35);

4) субстрат торфяно-перлитный ТУ, 3 г/л доломитовой муки и 3 кг/м³ удобрения «Осмокот Экзакт Мини, 5–6 М» (кассета F35);

5) субстрат торфяно-перлитный ТУ и 3 г/л доломитовой муки (кассета FD64).

Перед высевом желудей обрезали со стороны шляпки на 1/4 длины для стимуляции прорастания. С учетом позднего высева желудей выращивание осуществлялось в теплице до момента закаливания.

По результатам учета всхожесть желудей колебалась в пределах 78,1–88,6%, что значительно выше по сравнению с вариантами без обрезки желудей.

Результаты замеров высоты и диаметра сеянцев представлены в табл. 8.

По параметрам надземной части выращенные растения превысили значение стандартного посадочного материала, которое составляет по высоте надземной части не менее 12 см, а по диаметру стволика у корневой шейки не менее 3,0 мм, что говорит о возможности выращивания стандартных сеянцев дуба даже при таком позднем высева.

Список литературы

1. Стратегический план развития лесохозяйственной отрасли на период с 2016 по 2030 год: утв. Зам. Премьер-министра Респ. Беларусь 23.12.2014, № 06/201-271. Минск: М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 2015. 20 с.
2. Сарнацкий В. В., Шустова С. Ю. О задачах выращивания дубрав Беларуси в связи с интенсификацией лесопользования // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2020. № 1 (228). С. 48–54.
3. McRae J. Container Hardwood Seedling Production // USDA Forest Service Proceedings. 2005. No. 35. P. 26–27.
4. Economic evaluation of container seedling packing and disinfection machinery / J. Rantala [et al.] // Silva Fennica. 2003. No. 37 (1). P. 121–127.
5. Михайлова М. И., Малкина С. Ю., Чернышов М. П. Особенности выращивания сеянцев дуба черешчатого с закрытой корневой системой в Воронежском лесном селекционно-семеноводческом центре // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. науч. тр. 2015. № 9. Ч. 3. С. 114–119.

Таблица 8

Биометрические показатели сеянцев дуба черешчатого (высев 29.07.2022)

Вариант субстрата	$H_{\text{ср}}$, см	$D_{\text{ср}}$, мм
Кассета F35		
1	17,62 ± 0,48	3,21 ± 0,08
2	17,53 ± 0,68	3,13 ± 0,08
3	17,44 ± 0,41	2,79 ± 0,07
4	18,89 ± 0,53	3,26 ± 0,08
Кассета FD64		
5	17,22 ± 0,45	2,85 ± 0,06

Заключение. При выращивании посадочного материала дуба черешчатого с ЗКС необходимо обеспечить высокую грунтовую всхожесть, что позволит минимизировать количество пустых ячеек и повысить выход посадочного материала с единицы площади. Основными направлениями является сортировка семенного материала, оптимизация условий его хранения и подготовка желудей к посеву. Интерес также представляет возможность использования теплиц для получения сеянцев дуба после их освобождения от последней ротации хвойных.

По результатам проведенных исследований установлено, что использование метода хранения желудей в траншеях имеет незначительные преимущества перед методом хранения желудей в вентилируемых бочках в холодильных камерах.

Высокие показатели роста сеянцев обеспечиваются внесением в субстрат удобрений и незначительной нейтрализацией среды субстрата.

Использование обрезки желудей на 1/3 их длины приводит к повышению всхожести, но снижает размерные показатели сеянцев. Посев обрезанных желудей в конце июля позволяет выращивать стандартный материал при условии нахождения его в теплице до момента закаливания.

6. Effects of a deep container on morpho-functional characteristics and root colonization in *Quercus ruber* L. seedlings for reforestation in Mediterranean climate / E. Chirino [et al.] // *Forest Ecology and Management*. 2008. No. 256. P. 779–785.

7. Смышляева М. И., Краснов В. Г. Определение оптимального объема ячейки для выращивания сеянцев дуба черешчатого с закрытой корневой системой // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. науч. тр.* 2015. № 2. Ч. 2. С. 72–75.

8. Suszka B., Muller C., Bonnet-Masimbert M. *Nasiona Drzew Leśnych. Od zbioru do siewu*. Warszawa: Poznań: PWN, 2000. 307 s.

9. Suszka B. Generative propagation // *Nasze drzewa leśne*. Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe. 2006. S. 305–388.

10. Acorn size is more important than nursery fertilization for outplanting performance of *Quercus variabilis* container seedlings / W. Shi [et al.] // *Annals of forest science*. 2019. No. 76. DOI: 10.1007/s13595-018-0785-8.

11. Сиволапов А. И., Благодарова Т. А., Кошелев А. Ю. Выращивание крупномерных сеянцев дуба черешчатого с применением минеральных удобрений // *Успехи современного естествознания*. 2016. № 11. С. 70–74.

12. Devine W. D., Harrington C. A., Kraft J. M. Acorn storage alternatives tested on Oregon white oak // *Native plants*. 2010. No. 11 (1). P. 65–76.

13. Skrzyszewska K., Banach J., Bownik G. Wpływ sposobu przedsięwzięcia przygotowania żołądki i terminu siewu na kiełkowanie nasion i wzrost sadzonek dębu szypułkowego // *Sylwan*. 2019. No. 163 (9). S. 716–725.

14. Szabla K., Pabian R. *Szkolkarstwo kontenerowe. Nowe technologie i techniki w szkolkarstwie lesnym*. Warszawa: CILP, 2009. 253 s.

15. Schlegel T. K. *Frosthärteinduktion bei Eicheln*. Dissertation Doktors der Gartenbauwissenschaften. Hannover. 2001. 294 s.

16. Бондаренко А. С., Бутенко О. Ю. Влияние условий низкотемпературного хранения желудей дуба черешчатого на их посевные качества // *Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства*. 2018. № 1. С. 16–31.

17. Копытков В. В. Агротехника выращивания сеянцев дуба черешчатого с закрытой корневой системой с использованием микробных препаратов // *Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства*. 2019. № 2. С. 31–39.

18. Kaliniewicz Z., Tylek P. Influence of Scarification on the Germination Capacity of Acorns Harvested from Uneven-Aged Stands of Pedunculate Oak (*Quercus robur* L.) // *Forests*. 2018. No. 9 (3). P. 100.

19. Giertych M. J., Suszka J. Consequences of cutting off distal ends of cotyledons of *Quercus robur* acorns before sowing // *Annals of Forest Science*. 2011. No. 68. P. 433–442.

References

1. Strategic plan for the development of the forestry industry for the period from 2016 to 2030: approved by Deputy Prime Minister of the Republic of Belarus 23.12.2014, no. 06/201-271. Minsk, Ministry of Forestry Republic of Belarus Publ., 2015. 20 p. (In Russian).

2. Sarnatskiy V. V., Shustova S. Yu. On the tasks of growing oak forests in Belarus in connection with the intensification of forest management. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forest and Woodworking Industry, 2020, no. 1 (228), pp. 48–54 (In Russian).

3. McRae J. Container Hardwood Seedling Production. *USDA Forest Service Proceedings*, 2005, no. 35, pp. 26–27.

4. Rantala J., Väättäinen K., Kiljunen N., Harstela P. Economic evaluation of container seedling packing and disinfection machinery. *Silva Fennica*, 2003, no. 37 (1), pp. 121–127.

5. Mikhaylova M. I., Malkina S. Yu., Chernyshov M. P. Features of growing seedlings of English oak with a closed root system in the Voronezh forest selection and seed center. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika: sbornik nauchnykh trudov* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice: collection of scientific papers], 2015, no. 9, part 3, pp. 114–119 (In Russian).

6. Chirino E., Vilagrosa A., Hernandez E. I., Matos A., Vallejo V. R. Effects of a deep container on morpho-functional characteristics and root colonization in *Quercus ruber* L. seedlings for reforestation in Mediterranean climate. *Forest Ecology and Management*, 2008, no. 256, pp. 779–785.

7. Smyshlyayeva M. I., Krasnov V. G. Determination of the optimal volume for growing seedlings of English oak with a closed root system. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika: sbornik nauchnykh trudov* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice: collection of scientific papers], 2015, no. 2, part 2, pp. 72–75 (In Russian).

8. Suszka B., Muller C., Bonnet-Masimbert M. *Nasiona Drzew Leśnych. Od zbioru do siewu* [Seeds of forest trees. From harvest to sowing]. Warsaw, Poznan, PWN Publ., 2000. 307 p. (In Polish).
9. Suszka B. Generative propagation. *Nasze drzewa leśne* [Our forest trees]. Poznań, Bogucki Wydawnictwo Naukowe Publ., 2006, pp. 305–388 (In Polish).
10. Shi W., Villar-Salvador P., Li G., Jiang X. Acorn size is more important than nursery fertilization for outplanting performance of *Quercus variabilis* container seedlings. *Annals of forest science*, 2019, no. 76. DOI: 10.1007/s13595-018-0785-8.
11. Sivolapov A. I., Blagodarova T. A., Koshelev A. Yu. Growing large-sized seedlings of English oak with the use of mineral fertilizers. *Uspekhi sovremennoego estestvoznaniya* [Successes of modern natural science], 2016, no. 11, pp. 70–74 (In Russian).
12. Devine W. D., Harrington C. A., Kraft J. M. Acorn storage alternatives tested on Oregon white oak. *Native plants*, 2010, no. 11 (1), pp. 65–76.
13. Skrzyszewska K., Banach J., Bownik G.. Wpływ sposobu przedsięwzięcia przygotowania żołądki i terminu siewu na kiełkowanie nasion i wzrost sadzonek dębu szypułkowego. *Sylwan* [Silvan], 2019, no. 163 (9), pp. 716–725 (In Polish).
14. Szabla K., Pabian R. *Szkolkarstwo kontenerowe. Nowe technologie i techniki w szkolkarstwie lesnym* [Container nursery. New technologies and techniques in forest nursery], Warsaw, CILP Publ., 2009. 253 p. (In Polish).
15. Schlegel T. K. *Frosthärteinduktion bei Eicheln. Dissertation Doktors der Gartenbauwissenschaften* [Frost hardiness induction in acorns. Dissertation Doctor of Horticultural Sciences]. Hannover, 2001. 294 p. (In German).
16. Bondarenko A. S., Butenko O. Yu. Influence of conditions of low-temperature storage of pedunculate oak acorns on their sowing qualities. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry], 2018, no. 1, pp. 16–31 (In Russian).
17. Kopytkov V. V. Agrotechnics of growing seedlings of English oak with a closed root system using microbial preparations. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry], 2019, no. 2, pp. 31–39 (In Russian).
18. Kaliniewicz Z., Tylek P. Influence of Scarification on the Germination Capacity of Acorns Harvested from Uneven-Aged Stands of Pedunculate Oak (*Quercus robur* L.). *Forests*, 2018, no. 9 (3), p. 100.
19. Giertych M. J., Suszka J. Consequences of cutting off distal ends of cotyledons of *Quercus robur* acorns before sowing. *Annals of Forest Science*, 2011, no. 68, pp. 433–442.

Информация об авторах

Носников Вадим Валерьевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: nosnikov@belstu.by

Овсей Александр Анатольевич – главный специалист отдела лесного хозяйства. Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь (220030, г. Минск, ул. Мясникова, 39, Республика Беларусь). E-mail: ovsey@ministry.mlh.by

Мишина Виктория Эдуардовна – начальник научно-исследовательского отдела. Республиканский лесной селекционно-семеноводческий центр (223049, Минская область, Минский район, Р-1, 17-й км, Республика Беларусь). E-mail: nauka@rlssc.by

Потапова Александра Валерьевна – заместитель начальника научно-исследовательского отдела. Республиканский лесной селекционно-семеноводческий центр (223049, Минская область, Минский район, Р-1, 17-й км, Республика Беларусь). E-mail: nauka@rlssc.by

Information about the authors

Nosnikov Vadim Valer'evich – 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: nosnikov@belstu.by

Ovsey Alexander Anatolyevich – Chief Specialist of the Forestry Department, the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus (39, Myasnikova str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ovsey@ministry.mlh.by

Mishina Viktoriya Eduardovna – Head of research department. Republican breeding and seed production center (R-1, 17th km, 223049, Minsk region, Minsk district, Republic of Belarus). E-mail: nauka@rlssc.by

Potapova Aleksandra Valer'evna – deputy head of research department. Republican breeding and seed production center (R-1, 17th km, 223049, Minsk region, Minsk district, Republic of Belarus). E-mail: nauka@rlssc.by

Поступила 15.03.2023

УДК 630*116.24:630*416.16

И. В. Соколовский¹, А. А. Беспалый²¹Белорусский государственный технологический университет²Национальный парк «Припятский»**ПОЧВЫ НАСАЖДЕНИЙ ЯСЕНЯ ОБЫКНОВЕННОГО (*FRAXINUS EXCELSIOR*) НА БЕЛОРУССКОМ ПОЛЕСЬЕ, ИХ СТРОЕНИЕ, СОСТАВ И СВОЙСТВА**

Изучены условия произрастания насаждений ясеня обыкновенного на Белорусском Полесье. Установлено, что ясень произрастает на плодородных дерновых и дерново-карбонатных глееватых и глеевых почвах, а также на торфянисто-глеевых почвах низинного типа болот. Установлено, что с октября по май глееватые и глеевые почвы характеризуются избыточным увлажнением, а в августе грунтовые воды опускаются на глубину до 2 м, происходит иссушение корнеобитаемого слоя и отрыв его от грунтовых вод в силу низкой водоподъемной способности песчаных иллювиальных горизонтов. Таким образом создаются неблагоприятные условия для роста растений. В период иссушения корнеобитаемого слоя почвы до влажности завядания образуется крупнокомковатая структура с формированием некапиллярных пор, которые в сочетании с гидрофобностью коллоидов гумусовой природы препятствуют быстрому насыщению почвы влагой даже после обильных летних осадков, что увеличивает промежуток времени с неблагоприятным водным режимом. Иссушение почвы, ее промерзание и оттаивание приводят к интенсивному повреждению (разрыву) мелких корней, что способствует ослаблению растений и инфицированию патогенной микрофлорой.

Ключевые слова: почва дерновая, болото, ясень обыкновенный, береза, ольха черная, дуб, увлажнение, уровень грунтовых вод, строение, гранулометрический состав, гумус, усыхание, корни, структура.

Для цитирования: Соколовский И. В., Беспалый А. А. Почвы насаждений ясеня обыкновенного (*Fraxinus excelsior*) на Белорусском Полесье, их строение, состав и свойства // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 54–59. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-7.

I. V. Sokolovskiy¹, A. A. Bepalyy²¹Belarusian State Technological University,²Pripyatsky National Park**SOILS OF STANDS OF COMMON ASH (*FRAXINUS EXCELSIOR*) IN THE BELARUSIAN POLESIE, THEIR STRUCTURE, COMPOSITION AND PROPERTIES**

The conditions for the growth of plantings of common ash in the Belarusian Polesie were studied. It has been established that ash grows on fertile soddy and soddy-calcareous gleyic and gley soils, as well as on peaty-gley soils of low-lying bogs. It was found that from October to May, gleevate and gleev soils are characterized by excessive moisture, and in August, groundwater sinks to a depth of up to 2 m, the root layer is dried up and its separation from groundwater due to the low water-lifting capacity of sandy illuvial horizons. Thus, unfavorable conditions for plant growth are created. During the period of drying of the root-inhabited soil layer before withering moisture, a coarse-grained structure is formed with the formation of non-capillary pores, which, in combination with the hydrophobicity of colloids of humic nature, prevent the rapid saturation of the soil with moisture even after heavy summer precipitation, which increases the time interval with an unfavorable water regime. Desiccation of the soil, its freezing and thawing lead to intensive damage (rupture) of small roots, which contributes to the weakening of plants and infection with pathogenic microflora.

Key words: soddy soil, marsh, common ash, birch, black alder, oak, moisture, groundwater level, construction, grading, humus, drying out, roots, structure.

For citation: Sokolovskiy I. V., Bepalyy A. A. Soils of stands of common ash (*Fraxinus excelsior*) in the Belarusian Polesie, their structure, composition and properties. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 54–59. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-7 (In Russian).

Введение. Одной из ценных древесных пород в лесах Беларуси является ясень обыкновенный. Порода характеризуется высокой тре-

бовательностью к плодородию и влажности почвы. Однако выращиванию ясеня обыкновенного препятствует периодическое массовое

усыхание и ветровальность данной породы. Высокая ветровальность объясняется многими факторами, в том числе подверженностью к гниению корневой системы пораженных ясеней. У ослабленных гнилью деревьев может быть поражено до 40% корней. Усыхание ясеня отмечается как на территории Беларуси, так и практически по всему ареалу его распространения [1]. Беларусь представляет центральную часть ареала распространения ясеня обыкновенного, что определяется климатическими и почвенными условиями. Изучение почв, на которых произрастает ясень обыкновенный, позволит выявить основные причины этого негативного явления.

Основная часть. В работе проанализированы материалы крупномасштабных почвенных исследований лесного фонда Петриковского, Житковичского, Лельчицкого, Василевичского, Столинского лесхозов, НП «Припятский». В результате проведенной работы выявлены особенности строения, плодородия почв и их водного режима, формирования продуктивной влаги в вегетационный период в гумусовом и перегнойном горизонтах с учетом того, что основная масса корней ясеня (92%) сосредоточена в верхнем 20-сантиметровом слое почвы [2, 3]. Следует отметить, что ясень обыкновенный на территории Беларуси очень редко формирует чистые насаждения и преимущественно произрастает со многими древесными породами (ольха черная, береза, липа, вяз, граб, осина, сосна, дуб, клен) [1, 4, 5].

В результате анализа почвенного покрова указанных лесхозов установлено, что ясень произрастает на почвах, которые можно объединить в пять лесорастительных почвенных групп (табл. 1).

Ясень обыкновенный произрастает на глееватых и глеевых почвах, которые формируются под влиянием дернового и болотного процессов почвообразования, проточного увлажнения вблизи низинных болот и ручьев, способствующих накоплению органики в верхних горизонтах, а соответственно, и элементов питания растений. Указанная особенность состава верхних горизонтов почвы способствует интенсивному размножению почвенной микрофлоры, и лишь высокая динамика влаги в течение года (избыток влаги или ее недостаток в период вегетации) как фактор жизни растений снижает плодородие почв.

Уровень грунтовых вод в глееватых почвах на протяжении года сильно варьирует по глубине. Самый высокий уровень отмечается в период с ноября по май и составляет 0,2–0,4 м. В августе и сентябре в засушливые годы он глубже 2 м.

Глеевые почвы характеризуются выходом грунтовых вод на дневную поверхность с ноября по апрель, а во влажные годы они могут кратковременно наблюдаться на поверхности даже в летний период. Чаще грунтовые воды в глеевых почвах в летний период отмечаются на глубине 0,6–0,8 м. Аналогичная закономерность характерна и для болотно-глееватых почв низинного типа болот. Дерново-карбонатные глеевые и глееватые почвы занимают 8% от всей территории Белорусского Полесья. Эти почвы сформировались на супесчаных и суглинистых карбонатных почвообразующих породах с близким залеганием жестких грунтовых вод и встречаются преимущественно на территории Туровско-Давид-Городокского почвенного района [6, 7].

Таблица 1

Лесорастительные группы почв насаждений ясеня обыкновенного на Белорусском Полесье

Лесорастительная группа почв	Серия типов леса	Произрастающие древесные породы
1. Дерновые глееватые песчаные и супесчаные на водно-ледниковых и древнеаллювиальных песках и супесях, иногда подстилаемых суглинками или глинами различного происхождения	кис.	Дуб, ясень, береза, осина, сосна, липа, клен, вяз, граб
2. Дерновые и дерново-перегнойные глеевые песчаные и супесчаные на водно-ледниковых и древнеаллювиальных песках и супесях, иногда подстилаемые суглинками или глинами различного происхождения	кис., сн., тав., пап.	Ольха черная, береза, осина, ясень, дуб, граб, клен
3. Торфянисто-глеевые и торфянисто-перегнойно-глеевые низинного типа болот, на древесно-разнотравном торфе, подстилаемом песками	бр.	Ольха черная, береза, осина, ясень
4. Дерново-карбонатные глееватые супесчаные и суглинистые	кис., сн.	Дуб, ясень, береза, осина, липа, клен, вяз, граб
5. Дерновые и дерново-перегнойно-карбонатные глеевые супесчаные и суглинистые	сн., кр.	Ольха черная, береза, ясень, дуб

Таблица 2

Гранулометрический состав почв в насаждениях ясеня обыкновенного

№ пп	Горизонт	Глубина взятия образца, см	Размер частиц (см) и их содержание (%)					Название гранулометрического состава
			3–1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,01	менее 0,01	
Дерновая глееватая супесчаная на супеси рыхлой, сменяемой песками								
1	A ₁	5–10	–	15,1	61,4	12,8	10,7	Супесь рыхлая
	B _{1g}	30–40	–	13,5	61,5	16,0	9,0	Песок связный
	B _{2g}	60–70	–	21,6	66,4	7,5	4,5	Песок рыхлый
	G	90–110	–	28,1	64,8	4,5	2,6	Песок рыхлый
Дерновая глеевая супесчаная на супеси рыхлой, сменяемой песками								
2	A ₁	5–15	–	23,4	56,6	9,5	10,5	Супесь рыхлая
	B _{1g}	20–30	–	23,7	64,2	7,2	4,9	Песок рыхлый
	G	70–80	0,3	25,0	68,7	2,2	3,8	Песок рыхлый
Дерново-перегнойно-глеевая песчаная на песке связном, сменяемом песком рыхлым								
3	A _{пер}	10–20	–	15,2	63,7	12,6	8,5	Песок связный
	B _{1g}	35–45	–	9,8	71,1	14,5	4,6	Песок рыхлый
	G	70–80	–	14,7	59,8	23,2	2,3	Песок рыхлый
Торфянисто-перегнойно-глеевая низинного типа болот								
4	T ₁	5–20	–	–	–	–	–	–
	A _{пер}	20–30	2,2	23,7	56,3	9,1	8,7	Песок связный
	B _{1g}	60–70	–	29,5	55,6	10,7	4,2	Песок рыхлый
Дерново-карбонатная глеевая суглинистая на суглинке легком карбонатном, сменяемом песками								
5	A _{1k}	3–20	–	7,5	18,6	45,0	28,9	Суглинок легкий
	B _{1gk}	30–60	–	6,5	18,0	52,0	23,5	Суглинок легкий
	G _k	60–120	–	21,0	65,1	7,0	6,9	Песок связный

Почвообразующие породы всех почв характеризуются высокой сортированностью материала, и основу породы по гранулометрическому составу составляет фракция песка среднего (табл. 2).

В суглинистых генетических горизонтах карбонатных почв преобладает фракция мелкого песка. Гранулометрический состав иллювиальных генетических горизонтов указывает на их низкую водоудерживающую и высокую водопроницающую способность.

Содержание гумуса в гумусовом горизонте составляет 4–7%, а в перегнойном не менее 9%. Почвы характеризуются слабокислой или близкой к нейтральной реакции почвенного раствора (табл. 3). По содержанию подвижного фосфора и обменного калия почвы среднеобеспечены.

Анализируя агрохимические свойства почв, можно сделать вывод, что на них могут успешно произрастать все аборигенные древесные породы, формируя высокопродуктивные и устойчивые насаждения. Однако для успешного произрастания все факторы жизни растений должны находиться в оптимуме. Избыточное увлажнение приводит к недостатку кислорода в почве, затрудняет развитие почвенной микрофлоры. В зимний период происходит промерзание и оттаивание почвы, что приводит к повреждению мелких корней, изменению структуры

почвы, а в корни легко может проникать патогенная микрофлора.

В летний период почва часто иссушается до влажности завядания в гумусовом и перегнойном горизонтах и приобретает крупно-комковатую структуру, с некапиллярными порами. Запасы продуктивной влаги в августе практически отсутствуют (табл. 4).

Из-за высокой гидрофобности коллоидов гумусового происхождения в летний период даже обильные осадки практически не задерживаются в корнеобитаемом слое почвы, а по крупным некапиллярным порам проникают в нижележащие горизонты до уровня грунтовых вод. Это указывает на то, что в отдельные вегетационные периоды в почве отсутствует продуктивная влага в корнеобитаемом слое даже после его обильного увлажнения осадками из-за провальной водопроницающей способности гумусового и нижележащих горизонтов, представленных рыхлыми песками. Рыхлый песок обладает невысоким капиллярным поднятием на 60–80 см [8] и не способен увлажнять корнеобитаемый слой почвы грунтовой водой.

Это продлевает засушливый период, когда корневая система не способна обеспечить растение водой и элементами питания в период вегетации.

Таблица 3

Агрохимические свойства почв

ПП	Горизонт	Глубина взятия образца, см	Гумус, %	pH в KCl	Ca + Mg	ГК	Насыщенность основаниями, %	P ₂ O ₅	K ₂ O
					мг-экв. на 100 г почвы			мг на 100 г почвы	
Дерновая глееватая супесчаная на супеси рыхлой, сменяемой песками									
1	A ₁	5–10	4,2	5,5	14,24	2,5	85	8,2	10,5
	B _{1g}	30–40	0,1	6,3	3,2	0,8	80	3,4	5,5
	B _{2g}	60–70	–	6,5	2,6	0,7	79	6,3	5,5
	G	90–110	–	6,5	2,3	0,8	72	3,4	5,2
Дерновая глеевая супесчаная на супеси рыхлой, сменяемой песками									
2	A ₁	5–15	5,5	4,8	7,8	4,7	62	8,8	8,2
	B _{1g}	20–30	0,1	4,9	1,9	1,2	61	2,8	15,6
	G	70–80	–	5,2	2,0	1,2	64	2,2	4,0
Дерново-перегнойно-глеевая песчаная на песке связном, сменяемом песком рыхлым									
3	A _{пер}	10–20	9,9	5,0	30,0	7,5	80	15,0	10,0
	B _{1g}	35–45	0,4	5,6	2,8	1,7	62	15,0	3,9
	G	70–80	–	5,5	2,0	1,5	54	5,03	5,8
Торфянисто-перегнойно-глеевая низинного типа болот									
4	T ₁	5–20	–	4,4	63,7	132,1	51	2,8	12,5
	A _{пер}	20–30	9,1	4,5	41,8	56,3	74	5,3	16,8
	B _{1g}	60–70	0,3	4,7	2,8	4,0	70	3,4	3,4
Дерново-карбонатная глеевая суглинистая на суглинке легком карбонатном, сменяемом песками									
5	A _{1k}	3–20	7,2	7,3	Вскипает			13,4	12,5
	B _{1gk}	30–60	–	7,5	Вскипает			9,9	14,3
	G _k	60–120	–	7,6	Вскипает			11,2	10,9

Таблица 4

Динамика продуктивной влаги в верхнем слое почвы (0–20см), мм водного слоя

Гумус, %	2015 г.					2016 г.					2018 г.				
	V	VI	VII	VIII	IX	V	VI	VII	VIII	IX	V	VI	VII	VIII	IX
Дерновая глееватая супесчаная на супеси рыхлой, сменяемой песками															
3,7	60	58	33	5	25	54	39	26	8	31	62	46	31	12	25
Дерново-перегнойно-глеевая на песке связном, сменяемом песком рыхлым															
9,2	47	37	25	0	27	52	41	36	3	25	53	48	17	4	19
Дерново-карбонатная глеевая суглинистая на суглинке легком, сменяемом песками															
7,5	72	65	42	10	67	60	54	34	13	40	68	51	32	14	46

Заключение. Почвы произрастания ясеня обыкновенного на Белорусском Полесье характеризуются высокой динамикой увлажнения.

В зимний период при промерзании изменяется структура гумусового и перегнойного горизонтов, происходит разрыв мелких корней.

В засушливый год в вегетационный период наблюдается иссушение гумусового и перегнойного горизонтов почвы до влажности завядания, формируется крупно-комковатая структура, что также приводит к разрыву мелких корней, формированию крупных пор и медленному насыщению влагой корнеобитаемого слоя почвы даже в период обильных осадков из-за провальной водопроницаемости и гидрофобности коллоидов гумусовой природы.

Песчаные иллювиальные горизонты при опускании уровня грунтовых вод в период вегетации не способны обеспечивать корнеобитаемый слой почвы грунтовыми водами из-за их низкой водоудерживающей способности. В данный период наблюдается дефицит влаги в корнеобитаемом слое почвы, затормаживается процесс фотосинтеза у растений.

Зона распространения корней является наиболее биологически активной зоной (ризосфера), где микроорганизмы, подкармливаемые корневыми выделениями, размножаются чрезвычайно обильно [9], что может провоцировать развитие патогенной микрофлоры в ризосфере и способствовать инфицированию поврежденных корней.

Приведенная характеристика почв указывает, что они создают условия «рискованного лесоводства», которые в земледелии на черноземах рассматриваются как «рискованное земледелие». Гарантированное выращивание ясеня на данных почвах возможно осуществлять путем регулирования водного режима.

Следует согласиться с выводами исследователей [10], что желательнее создавать или формировать на данных почвах смешанные

насаждения ясеня с примесью других ценных пород для снижения вероятности экологического и экономического риска, связанного с неустойчивым фитопатологическим состоянием этой породы, но они не должны превышать 50%, так как при большей доле их участия в составе ясеня может угнетаться вследствие конкуренции за питательные вещества, а также претерпевать изменения физических и эдафических факторов.

Список литературы

1. Звягинцев В. Б., Сазонов А. А. Массовое усыхание ясеня обыкновенного в лесах Беларуси // Устойчивое развитие лесов и рациональное использование лесных ресурсов: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 6–7 дек. 2005 г. Минск, 2005. С. 225–227.
2. Рахтеенко И. Н., Нестерович Н. Д. Эколого-физиологические основы взаимодействия растений в фитоценозах. Минск: Наука и техника, 1976. 211 с.
3. Чумакова А. В., Васильев Н. Г. Ясень. М.: Лесная пром-сть, 1984. 101 с.
4. Юркевич И. Д., Гельтман В. С. География, типология и районирование лесной растительности Белоруссии. Минск: Наука и техника, 1965. 288 с.
5. Юркевич И. Д., Адерихо В. С. Типы и ассоциации ясеневых лесов. Минск: Наука и техника, 1973. 255 с.
6. Стецко В. В. Специфические особенности растительности и почв Белорусского Полесья // Агрохимические характеристики почв БССР. 1969. Вып. VI. С. 169–173.
7. Соколовский И. В., Беспалый А. А. Дерново-карбонатные полугидроморфные лесные почвы Белорусского Полесья // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. ИЛ НАН Беларуси. Гомель, 2012. Вып. 72. С. 408–412.
8. Смоляк Л. П., Петров Е. Г. Водное питание и продуктивность сосновых фитоценозов. Минск: Наука и техника, 1978. 184 с.
9. Корневые выделения // Справочник агрохимика 21 века. URL: <https://www.chem21.info/article/524546/> (дата обращения: 08.02.2023).
10. Штукин С. С., Шауро С. Г. Приоритетные типы лесных культур ясеня обыкновенного в условиях Беларуси // Лесное и охотничье хозяйство. 2009. № 1. С. 17–22.

References

1. Zvyagintsev V. B., Sazonov A. A. Mass desiccation of common ash in the forests of Belarus. *Ustoychivoye razvitiye lesov i ratsional'noye ispol'zovaniye lesnykh resursov: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Sustainable forest development and rational use of forest resources: materials of the International Scientific and Practical Conference], Minsk, 2005, pp. 225–227 (In Russian).
2. Rakhtenko I. N., Nesterovich N. D. *Ekologo-fiziologicheskiye osnovy vzaimodeystviya rasteniy v fitotsenozach* [Ecological and physiological bases of plant interaction in phytocenoses]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1976. 211 p. (In Russian).
3. Chumakova A. V., Vasiliev N. G. *Yasen'* [Ash]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 101 p. (In Russian).
4. Yurkevich I. D., Geltman V. S. *Geografiya, tipologiya i rayonirovaniye lesnoy rastitel'nosti Belarusi* [Geography, typology and zoning of forest vegetation of Belarus]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1965. 288 p. (In Russian).
5. Yurkevich I. D., Adericho V. S. *Tipy i assotsiatsii yasenevykh lesov* [Types and associations of ash forests]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1973. 255 p. (In Russian).
6. Stetsko V. V. Specific features of vegetation and soils of the Belarusian Polesie. *Agrokhimicheskiye kharakteristiki pochv BSSR* [Agrochemical characteristics of soils of the BSSR], 1969, issue VI, pp. 169–173 (In Russian).
7. Sokolovskiy I. V., Bepalyy A. A. Sod-carbonate semi-hydromorphic forest soils of the Belarusian Polesie. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva: sbornik nauchnykh trudov Instituta lesa Natsional'noy akademii nauk Belarusi* [Problems of forest science and forestry: collection of scientific works of the Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus]. Gomel, 2012, issue 72, pp. 408–412 (In Russian).

8. Smolyak L. P., Petrov E. G. *Vodnoye pitaniye i produktivnost' osnovnykh fitotsenozov* [Water nutrition and productivity of pine phytocenoses]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1978. 184 p. (In Russian).

9. Root selections. Available at: <https://www.chem21.info/article/524546/> (accessed 08.02.2023) (In Russian).

10. Shtukin S. S., Shauro S. G. Priority types of forest plantations of common ash in the conditions of Belarus. *Lesnoye i okhotnich'ye khozyaystvo* [Forestry and hunting economy], 2009, no. 1, pp. 17–22 (In Russian).

Информация об авторах

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

Беспалый Андрей Александрович – начальник научного отдела. Национальный парк «Припятский» (247946, Гомельская обл., Петриковский р-н, а. г. Лясковичи, ул. Глушко, 7а, Республика Беларусь). E-mail: andrei.bespalyi@mail.ru

Information about the authors

Sokolovskiy Ivan Vasilievich – 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

Bespalyu Andrey Aleksandrovich – Head of the Scientific Department. Prip'yatsky National Park (7a, Glushko str., agro-town Lyaskovichi, 247946, Petrikov district, Gomel region, Republic of Belarus). E-mail: andrei.bespalyi@mail.ru

Поступила 10.03.2023

УДК 630*232

M. Alam, V. V. Nosnikov
Belarusian State Technological University

IMPROVING *PINUS PINEA* PLANTATION SUCCESS WITH HYDROGEL

This scientific article reports the results of an experiment conducted in Lebanon to investigate the effectiveness of hydrogel on the survivability of *Pinus pinea* seedlings during the plantation phase under high temperatures and prolonged drought due to climate change. The experiment covered a representative geographical area in Lebanon with different micro-climatic zones across the country, and used seedlings between 1 to 2 years old. The experiment consisted of a control line and other lines treated with different amounts of hydrogel, water, and fertilizer. The results showed that hydrogel significantly increased the survivability of *Pinus pinea* seedlings during the plantation phase, with the best results achieved when the hydrogel was applied at a rate of 0.75 g per seedling mixed with same amount of fertilizer. The study also showed that the use of hydrogel reduced the need for watering, making it a cost-effective and sustainable solution for improving the survivability of seedlings under harsh environmental conditions. These findings have important implications for the reforestation efforts in Lebanon, where climate change poses a significant threat to the survival of seedlings during the plantation phase. The study provides a practical solution that can be used to improve the survivability of seedlings, thus contributing to the sustainability of forest ecosystems in the region. Further research is needed to explore the long-term effects of hydrogel on the growth and development of *Pinus Pinea* seedlings.

Keywords: *Pinus pinea*, hydrogel, survival rate, growth performance, soil analysis, climate conditions, seedling development.

For citation: Alam M., Nosnikov V. V. Improving *Pinus pinea* plantation success with hydrogel. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 60–66. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-8 (In English).

M. Alam, В. В. Носников

Белорусский государственный технологический университет

ПОВЫШЕНИЕ ПРИЖИВАЕМОСТИ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР СОСНЫ ИТАЛЬЯНСКОЙ (*PINUS PINEA*) С ПОМОЩЬЮ ГИДРОГЕЛЯ

В данной научной статье сообщаются результаты проведенного в Ливане эксперимента по изучению влияния гидрогеля на приживаемость сеянцев *Pinus pinea* на этапе посадки в условиях высоких температур и длительной засухи, вызванных изменением климата. В эксперименте был охвачен репрезентативный географический район Ливана с различными микроклиматическими зонами по всей стране и использовались сеянцы в возрасте от 1 до 2 лет. Эксперимент состоял из контроля и вариантов, обработанных различным количеством гидрогеля, воды и удобрения. Результаты показали, что гидрогель значительно повысил выживаемость сеянцев *Pinus pinea* на этапе посадки. Наилучшие показатели были достигнуты при использовании 0,75 г на сеянец гидрогеля, смешанного с таким же количеством удобрения. В процессе исследования было установлено, что гидрогель снижает потребность в поливе, поэтому является экономически эффективным и устойчивым решением для повышения выживаемости рассады в суровых условиях окружающей среды. Эти выводы имеют важное значение для лесовосстановления в Ливане, где особенности климата представляют серьезную угрозу выживанию растений на этапе посадки. Эксперимент предлагает практическое решение, которое можно использовать для повышения приживаемости сеянцев, тем самым способствуя устойчивости лесных экосистем в регионе. Однако необходимы дальнейшие исследования для изучения долгосрочного воздействия гидрогеля на рост и развитие сеянцев *Pinus pinea*.

Ключевые слова: *Pinus pinea*, гидрогель, приживаемость, особенности роста, анализ почвы, климатические условия, развитие сеянцев.

Для цитирования: Alam M., Носников В. В. Повышение приживаемости лесных культур сосны итальянской (*Pinus pinea*) с помощью гидрогеля // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 60–66. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-8.

Statement of the problem. Climate change has brought about various environmental challenges, such as droughts and high temperatures, which affect the growth and survival of plants. The Mediterranean region, including Lebanon, has been greatly impacted by these challenges, leading to a decline in the growth and survival rates of plants. To combat this issue, various techniques have been implemented, including the use of hydrogel, which is known to enhance soil water retention and thus increase plant growth and survival rates. However, the effectiveness of hydrogel in improving the survival rate of *Pinus pinea* seedlings, a crucial tree species in Lebanon, has not been thoroughly studied. Therefore, this study aimed to investigate the effectiveness of hydrogel in increasing the survival rate of *Pinus pinea* seedlings under conditions of high temperatures and prolonged drought caused by climate change. The study also aimed to identify the most effective hydrogel treatment to enhance the survival rate of the seedlings.

Introduction. Climate change is a significant global challenge that has been observed to affect plant growth and survival [1]. The impact of climate change on plant growth and survival is more significant in arid and semi-arid regions, where high temperatures and prolonged drought are common [1]. One of the ways to mitigate the effects of climate change on plant growth and survival is by using hydrogels, which have been shown to increase water retention and plant survival under drought conditions [1]. Hydrogels are hydrophilic materials that can absorb and retain a significant amount of water, up to several hundred times their weight. The use of hydrogels in agriculture and horticulture has been widely studied in recent years due to its potential to improve plant growth and survival under adverse climatic conditions.

Pinus pinea, commonly known as the stone pine, is a coniferous tree species that is native to the Mediterranean region, including Lebanon. *Pinus pinea* is an important tree species in Lebanon due to its high ecological, economic, and cultural value [2]. The species has been observed to be sensitive to drought and high temperatures, making it vulnerable to the effects of climate change [2]. To ensure the survival and growth of *Pinus pinea* seedlings under changing climatic conditions, there is a need to develop effective management practices that can increase their survival rate during the plantation phase.

The aim of this study was to investigate the effect of hydrogel on the survival rate of *Pinus pinea* seedlings during the plantation phase in Lebanon. Specifically, the study aimed to evaluate the effectiveness of hydrogel in increasing the survival rate of *Pinus pinea* seedlings under high temperature and prolonged drought conditions. The study also aimed to determine the optimal concentration of hydrogel that

can enhance the survival rate of *Pinus pinea* seedlings during the plantation phase.

To achieve the study objectives, a field experiment was conducted on a representative geographical area in Lebanon covering different micro-climatical zones across the country. The experiment involved the use of *Pinus pinea* seedlings aged between 1 and 2 years old, divided into two groups based on age, with each group containing seven lines, and each line consisting of ten seedlings. The experiment consisted of a total of 140 seedlings that were equally divided into the two groups. The first group contained 70 seedlings of 1 year old, and the second group contained seedlings of 2 years old. The seedlings were treated in different ways in each line, with the first line being used as the control line, and the other lines treated with varying amounts of hydrogel, water, and fertilizer. The hydrogel was prepared according to the manufacturer's recommendations.

The experiment aimed to eliminate any weather or soil condition that may affect the study, and the chosen plot was fenced to eliminate any animal or human interaction with the seedlings. The soil was cleared from any weeds or small shrubs that may affect the seedlings, and holes with 40 cubic centimeters homogenic dimensions were excavated, creating a separation of 1 meter interlines, and 1 meter inter seedlings. During Plantation, the seedlings were planted same day going line by line in both 1st and 2nd age group, starting from the first line T0 finishing by the seventh line T6 to avoid any errors and confusion.

The findings of this study have significant implications for the management of *Pinus pinea* seedlings during the plantation phase under changing climatic conditions. The study provides valuable information on the effectiveness of hydrogel in increasing the survival rate of *Pinus pinea* seedlings, which can be used to develop effective management practices for the species. Additionally, the study contributes to the body of knowledge on the use of hydrogel in agriculture and horticulture in arid and semi-arid regions.

The ANOVA statistical method was used to evaluate which treatments (T2, T3, T4, T5 and T6) have a significant effect on the seedlings.

Results and discussion. The survival rate and growth performance of the *Pinus pinea* seedlings were evaluated in both the control and experimental groups. After three months, the survival rates of the 1-year-old seedlings were 20% in the control group T0, 80% in T1, and 88% in the experimental group, while the survival rates of the 2-year-old seedlings were 10% in the control group T0, 40% in T1, and 72% in the experimental groups. These results indicate that the use of hydrogel in the experimental group significantly increased the survival rates of the seedlings, particularly in the 1-year-old group.

The height and basal diameter of the seedlings were also measured. The results showed that the use of hydrogel significantly improved the growth performance of the seedlings in both age groups. In the 1-year-old group the height of the seedlings didn't show any significant increase in control group, especially due to the short duration of survivability. In the experimental group, a track of 2.8% on average increase in height growth, with a significant average growth of 5.42% cm in T6. The average basal diameter of the seedlings was measured with no trace of diameter size increasing for control group and an average of 14% increase in the experimental group, yet another measurement will be taking place in June 2023.

In the 2-year-old group, the average height of the seedlings in the control group same as the 1-year-old group, no significant changes due to same reason related to high percentage of mortality and non-availability of water; While the experimental group, indicating a 1.5% increase on average in height growth, with a significant average growth of 1.9% cm in T6. The average basal diameter of the seedlings was measured with no trace of diameter size increasing for control group and an average of 16.6% increase in the experimental group, yet another measurement will be taking place in June 2023. These results suggest that the use of hydrogel not only increased the survival rates of the seedlings, but also improved their growth performance, particularly in the 1-year-old group.

Overall, the results of this study indicate that the use of hydrogel during the plantation phase of *Pinus pinea* seedlings can significantly increase their survival rates and growth performance, particularly in the 1-year-old group. The improved root development observed in the experimental group may also have important implications for the long-term growth and survival of the trees, especially in areas where water availability is limited.

The higher survival rate observed in the hydrogel-treated group suggests that the hydrogel was effective in maintaining moisture levels around the roots of the seedlings, thereby reducing the stress caused by drought conditions. This finding is consistent with previous studies that have reported the effectiveness of hydrogel in improving plant survival under drought stress [3–5]. The hydrogel may have also helped to improve the uptake of nutrients by the seedlings, resulting in the observed increase in height and diameter growth.

The slow improved growth performance observed in the 1-year-old group may be due to their larger size and more developed root systems, which would have taken more time to establish allowing them to take advantage of the increased water and nutrient availability provided by the hydrogel. The fact that the 1-year-old group did show a significant

improvement in growth performance despite their smaller size and less developed root systems, which may have limited their ability to take advantage of the increased water and nutrient availability provided by the hydrogel, yet managed to show significant survivability rates.

The observation of more fibrous roots in the hydrogel-treated group is consistent with the known effects of hydrogel on root development. Hydrogel has been shown to promote the development of fibrous roots by maintaining a more consistent and optimal moisture level around the root zone [4, 5]. This effect may have contributed to the observed increase in growth performance and survival rate in the hydrogel-treated group.

It is important to note that the benefits observed in this study may be specific to the particular environmental conditions and soil type of the study site. Further studies are needed to determine the effectiveness of hydrogel in other environments and soil types. Additionally, future studies may explore the potential of combining hydrogel with other soil amendments, such as fertilizers or mulch, to further improve seedling survival and growth performance.

Generally, the results of this study suggest that the use of hydrogel during the plantation phase of *Pinus pinea* seedlings can significantly improve their survival rates and growth performance, particularly in older seedlings with more developed root systems. The observed increase in fibrous root development may have important implications for the long-term growth and survival of the trees, especially in areas where water availability is limited. These findings may have important implications for reforestation efforts in regions affected by climate change and drought conditions.

The climate data recorded during the study period is an essential aspect of understanding the results of this experiment. The study was conducted in Lebanon, a country located in the Mediterranean region, with a semi-arid climate characterized by hot summers and mild winters. The experimental plot covered different micro-climatical zones across the country, representing a variety of soil and climatic conditions, which is important for understanding how hydrogel treatment may perform under different circumstances.

During the four-month study period, the average temperature was 25.3°C, which is higher than the optimal temperature range for *Pinus pinea* seedling growth. The average humidity of 52.1% was within the range considered suitable for seedling growth. The highest temperature recorded during the study was 32.5°C, while the lowest temperature was 18.6°C. The temperature variation within this range could be detrimental to seedling survival and growth as it may cause physiological stress, affecting water uptake and photosynthesis. However, the

hydrogel treatment provided a positive impact on seedling survival and growth despite the unfavorable climatic conditions.

Rainfall is an essential factor that affects seedling growth and survival. During the study period, the average rainfall was null during dry season, with an average of 37 and 60 mm respectively in November and December, which is below the average annual rainfall in Lebanon. The lower-than-average rainfall during the study period may have contributed to the reduced survival rates of the control group. However, the hydrogel treatment significantly improved the survival rates and growth of the seedlings, indicating that the hydrogel's water-holding capacity contributed to better seedling performance under low rainfall conditions.

The data collected during the study period highlights the potential of hydrogel treatment in improving seedling survival and growth under unfavorable climatic conditions. The hydrogel's capacity to absorb and retain water is essential in mitigating the effects of water stress on seedling growth, particularly in arid and semi-arid regions. The results of this study suggest that hydrogel treatment can be an effective strategy for enhancing seedling performance, especially under low rainfall and high-temperature conditions, which are prevalent in many regions worldwide.

The climate data recorded during the study period provides critical information on the environmental conditions that influenced the seedling survival and growth. The hydrogel treatment was found to improve the performance of the seedlings, even under unfavorable climatic conditions. The results of this study highlight the potential of hydrogel treatment as a cost-effective and sustainable solution to improve seedling performance and promote reforestation efforts in arid and semi-arid regions. However, further studies are required to investigate the optimal application rates of hydrogel under different soil and climatic conditions to maximize its potential in enhancing seedling growth and survival.

Soil analysis is an important aspect of evaluating the growth and survival of plants in a particular area. In this study, the soil in the experimental area was analyzed to determine its suitability for the growth and survival of *Pinus pinea* seedlings. The pH of the soil was found to be slightly acidic, which is within the acceptable range for this species. The organic matter content of the soil was 2.3%, which is considered adequate for plant growth. Organic matter is essential for soil structure, nutrient availability, and water-holding capacity. The total nitrogen content was 0.23%, which is also considered suitable for *Pinus pinea* seedlings. Nitrogen is an essential element for plant growth, as it is a major component of chlorophyll and amino acids.

The use of hydrogel during the plantation phase of *Pinus pinea* seedlings can have a significant impact on the soil. Hydrogel has been shown to improve soil structure, nutrient availability, and water-holding capacity [6–8]. The hydrogel used in this study is a type of superabsorbent polymer that can absorb and hold large amounts of water. This can help to reduce water stress in plants, particularly during dry periods.

The hydrogel treatment in this study may have had a positive effect on the soil properties. The hydrogel may have improved soil structure by reducing compaction and increasing porosity. This, in turn, can increase the availability of air and water to the roots of the seedlings. The hydrogel may have also improved nutrient availability by reducing leaching and increasing retention. This can help to ensure that the seedlings have access to the nutrients they need for growth and survival.

The use of hydrogel in this study may have also had a positive effect on soil microorganisms. Soil microorganisms play a vital role in nutrient cycling and organic matter decomposition [9]. The hydrogel may have provided a favorable environment for microorganisms by increasing soil moisture and reducing water stress. This, in turn, can increase microbial activity and nutrient availability.

Generally, the soil analysis results indicate that the soil in the experimental area was suitable for the growth and survival of *Pinus pinea* seedlings. The use of hydrogel during the plantation phase may have further improved the soil properties, which may have contributed to the improved growth and survival of the seedlings. Future research could explore the long-term effects of hydrogel on soil properties and microorganisms in different environments.

The results of this study demonstrate that the use of hydrogel can significantly improve the growth and survival of *Pinus pinea* seedlings during the planting phase, especially in the face of unfavorable climatic conditions. The hydrogel treatment improved the survival rate and growth of the seedlings by maintaining the moisture content of the soil and providing a favorable environment for the seedlings to grow.

The results of the study are consistent with previous studies that have shown the effectiveness of hydrogel in promoting plant growth and survival. The hydrogel acts as a water reservoir and slowly releases water to the plants, which reduces the frequency of irrigation and increases the availability of water for the plant [10]. The hydrogel also improves the soil structure by increasing its water-holding capacity, which provides a favorable environment for the seedlings to grow.

The climate data recorded during the study period shows that the hydrogel treatment was effective

in improving the survival and growth of the seedlings despite the unfavorable climatic conditions. The average temperature during the study period was 25.3°C, which is higher than the optimum temperature range for *Pinus pinea* growth (15–25°C). The hydrogel treatment maintained the soil moisture content and reduced water stress on the seedlings, which is essential for their survival and growth in high-temperature conditions.

The soil analysis results show that the soil in the experimental area was suitable for *Pinus pinea* growth, and the hydrogel treatment further improved the growth and survival of the seedlings. The slightly acidic soil with a pH of 6.4 is suitable for the growth of *Pinus pinea* as it prefers slightly acidic soils [10–12]. The organic matter content and total nitrogen content in the soil were also within the suitable range for the growth of *Pinus pinea*. The hydrogel treatment maintained the soil moisture content, which is crucial for the growth and survival of seedlings in dry soils. Moreover, according to Sarvaš and colleagues (2008) and [13] the hydrogel improves the soil structure by increasing its water-holding capacity, which provides a favorable environment for the root development of seedlings.

The results of this study suggest that the use of hydrogel can be an effective strategy for promoting the growth and survival of *Pinus pinea* seedlings during the planting phase. The hydrogel treatment is a simple, cost-effective, and environmentally friendly approach that can be easily applied to large-scale plantation projects [14]. Additionally, according to Tomášková and colleagues (2020), the use of hydrogel can also reduce the frequency of irrigation, thereby reducing water usage and conserving water resources.

However, it is worth noting that the optimal dosage and application frequency of hydrogel may vary depending on the soil type, climatic conditions, and plant species [14]. Therefore, further research is needed to determine the appropriate hydrogel application rate and frequency for different soil types and climatic conditions. Additionally, long-term studies are needed to evaluate the impact of hydrogel on the growth and survival of *Pinus pinea* seedlings in the later stages of their growth.

Overall, this study demonstrates that the use of hydrogel can significantly improve the growth and

survival of *Pinus pinea* seedlings during the planting phase, particularly in unfavorable climatic conditions. The hydrogel treatment maintained the moisture content of the soil, which is essential for the growth and survival of seedlings, and improved the soil structure, which provides a favorable environment for the root development of seedlings. Therefore, the use of hydrogel can be a cost-effective and environmentally friendly approach for promoting the growth and survival of *Pinus pinea* seedlings in large-scale plantation projects.

Conclusion. In conclusion, the use of hydrogel during the plantation phase of *Pinus pinea* seedlings can significantly improve their growth and survival rates, especially in unfavorable climatic conditions. The results of the study indicate that hydrogel can be an effective method to enhance the survival and growth of seedlings during the critical phase of planting. The hydrogel treatment improved root development, shoot growth, and survival rates in both the 1-year-old and 2-year-old seedlings.

The study confirms the effectiveness of hydrogel in promoting plant growth and survival, consistent with previous studies. The hydrogel acts as a water reservoir, maintaining the moisture content of the soil and providing a favorable environment for the seedlings to grow. The hydrogel also improves the soil structure, increasing its water-holding capacity, and reducing water stress on the seedlings.

The results of the study have important implications for the reforestation efforts in areas with unfavorable climatic conditions. The use of hydrogel can enhance the survival and growth of seedlings, improving the success of reforestation efforts. Furthermore, the study provides valuable insights into the mechanisms by which hydrogel promotes plant growth and survival, which can be applied in future research to improve the effectiveness of hydrogel in reforestation efforts.

In conclusion, the use of hydrogel during the plantation phase of *Pinus pinea* seedlings can significantly improve their growth and survival rates, and the results of the study provide valuable insights into the mechanisms by which hydrogel promotes plant growth and survival. The study highlights the potential of hydrogel as an effective method to enhance the success of reforestation efforts, particularly in areas with unfavorable climatic conditions.

References

1. Lawlor D. W. Plant growth and climate change. *Annals of Botany*, 2007, no. 100 (4), pp. 890–891. DOI: 10.1093/aob/mcm188.
2. *Pinus pinea* (stone pine) *CABI Compendium*. 28 February 2022. DOI: 10.1079/cabicompendium.41689.
3. Abdallah A. M. The effect of hydrogel particle size on water retention properties and availability under water stress. *International Soil and Water Conservation Research*, 2019, no. 7 (3), pp. 275–285. DOI: 10.1016/j.iswcr.2019.05.001.

4. Agaba H., Baguma Orikiriza L. J., Osoto Esegu J. F., Obua J., Kabasa J. D., Hüttermann A. Effects of hydrogel amendment to different soils on plant available water and survival of trees under drought conditions. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 2010, no. 38 (4), pp. 328–335. DOI: 10.1002/clen.200900245.
5. Chirino E., Vilagrosa A., Vallejo V. R. Using hydrogel and clay to improve the water status of seedlings for dryland restoration. *Plant and Soil*, 2011, no. 344 (1–2), pp. 99–110. DOI: 10.1007/s11104-011-0730-1.
6. El-Asmar J., Jaafar H., Bashour I., Farran M. T., Saoud I. P. Hydrogel banding improves plant growth, survival, and water use efficiency in two calcareous soils. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 2017, no. 45 (7), pp. 170–251. DOI: 10.1002/clen.201700251.
7. Han B., Benner S. G., Flores A. N. Evaluating impacts of climate change on future water scarcity in an intensively managed semi-arid region using a coupled model of biophysical processes and water rights. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2018, no. 1 (2), pp. 1–53. DOI: 10.5194/hess-2018-140.
8. Hüttermann A., Zommodi M., Reise K. Addition of hydrogels to soil for prolonging the survival of *Pinus halepensis* seedlings subjected to drought. *Soil and Tillage Research*, 1999, no. 50 (3–4), pp. 295–304. DOI: 10.1016/s0167-1987(99)00023-9.
9. Konzen E. R., Navroski M. C., Friederichs G., Ferrari L. H., Pereira M. de O., Felipe D. The use of hydrogel combined with appropriate substrate and fertilizer improve quality and growth performance of *Mimosa scabrella* Benth. seedlings. *Cerne*, 2017, no. 23 (4), pp. 473–482. DOI: 10.1590/01047760201723042440.
10. Montesano F. F., Parente A., Santamaria P., Sannino A., Serio F. Biodegradable superabsorbent hydrogel increases water retention properties of growing media and plant growth. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2015, no. 4 (1), pp. 451–458. DOI: 10.1016/j.aaspro.2015.03.052.
11. Navroski M. C., Araújo M. M., Cunha F. S., Berghetti A. L. P., Pereira M. O. Influência do polímero hidroretentor na sobrevivência de mudas de *Eucalyptus dunnii* sob diferentes manejos hídricos. *Nativa*, 2014, no. 2 (2), pp. 108–113. DOI: 10.14583/2318-7670.v02n02a08.
12. Orikiriza L. J. B., Agaba H., Eilu G., Kabasa J. D., Worbes M., Hüttermann A. Effects of hydrogels on tree seedling performance in temperate soils before and after water stress. *Journal of Environmental Protection*, 2013, no. 4 (7), pp. 713–721. DOI: 10.4236/jep.2013.47082.
13. Sarvaš M., Pavlenda P., Takáčová E. Effect of hydrogel application on survival and growth of pine seedlings in reclamations. *Journal of Forest Science*, 2008, no. 53 (5), pp. 203–209. DOI: 10.17221/2178-jfs.
14. Tomášková I., Svatoš M., Macků J., Vanická H., Resnerová K., Čepl J., Holuša J., Hosseini S. M., Dohrenbusch A. Effect of different soil treatments with hydrogel on the performance of drought-sensitive and tolerant tree species in a semi-arid region. *Forests*, 2020, no. 11 (2), pp. 211. DOI: 10.3390/f11020211.

Список литературы

1. Lawlor D. W. Plant growth and climate change // *Annals of Botany*. 2007. No. 100 (4). P. 890–891. DOI: 10.1093/aob/mcm188.
2. *Pinus pinea* (stone pine) // *CABI Compendium*. 2022. 28 February. DOI: 10.1079/cabicompendium.41689.
3. Abdallah A. M. The effect of hydrogel particle size on water retention properties and availability under water stress // *International Soil and Water Conservation Research*. 2019. No. 7 (3). P. 275–285. DOI: 10.1016/j.iswcr.2019.05.001.
4. Effects of hydrogel amendment to different soils on plant available water and survival of trees under drought conditions / H. Agaba [et al.] // *CLEAN – Soil, Air, Water*. 2010. No. 38 (4). P. 328–335. DOI: 10.1002/clen.200900245
5. Chirino E., Vilagrosa A., Vallejo V. R. Using hydrogel and clay to improve the water status of seedlings for dryland restoration // *Plant and Soil*. 2011. No. 344 (1–2). P. 99–110. DOI: 10.1007/s11104-011-0730-1.
6. Hydrogel banding improves plant growth, survival, and water use efficiency in two calcareous soils / J. El-Asmar [et al.] // *CLEAN – Soil, Air, Water*. 2017. No. 45 (7). P. 170–251. DOI: 10.1002/clen.201700251.
7. Han B., Benner S. G., Flores A. N. Evaluating impacts of climate change on future water scarcity in an intensively managed semi-arid region using a coupled model of biophysical processes and water rights // *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 2018. No. 1 (2). P. 1–53. DOI: 10.5194/hess-2018-140.
8. Hüttermann A., Zommodi M., Reise K. Addition of hydrogels to soil for prolonging the survival of *Pinus halepensis* seedlings subjected to drought // *Soil and Tillage Research*. 1999. No. 50 (3–4). P. 295–304. DOI: 10.1016/s0167-1987(99)00023-9.

9. The use of hydrogel combined with appropriate substrate and fertilizer improve quality and growth performance of *Mimosa scabrella* Benth. seedlings / E. R. Konzen [et al.] // *Cerne*. 2017. No. 23 (4). P. 473–482. DOI: 10.1590/01047760201723042440.

10. Biodegradable superabsorbent hydrogel increases water retention properties of growing media and plant growth / F. F. Montesano [et al.] // *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2015. No. 4 (1). P. 451–458. DOI: 10.1016/j.aaspro.2015.03.052.

11. Influência do polímero hidroretentor na sobrevivência de mudas de *Eucalyptus dunnii* sob diferentes manejos hídricos / M. C. Navroski [et al.] // *Nativa*. 2014. No. 2 (2). P. 108–113. DOI: 10.14583/2318-7670.v02n02a08.

12. Effects of hydrogels on tree seedling performance in temperate soils before and after water stress / L. J. B. Oriquiriza [et al.] // *Journal of Environmental Protection*, 2013. No. 4 (7). P. 713–721. DOI: 10.4236/jep.2013.47082.

13. Sarvaš M., Pavlenda P., Takáčová E. Effect of hydrogel application on survival and growth of pine seedlings in reclamations // *Journal of Forest Science*. 2008. No. 53 (5). P. 203–209. DOI: 10.17221/2178-jfs.

14. Effect of Different Soil Treatments with Hydrogel on the Performance of Drought-Sensitive and Tolerant Tree Species in a Semi-Arid Region / I. Tomášková [et al.] // *Forests*. 2020. No. 11 (2). P. 211. DOI: 10.3390/f11020211.

Information about the authors

Alam Michel – postgraduate student, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: michelalam@gmail.com

Nosnikov Vadim Valer'evich – 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: nosnikov@belstu.by

Информация об авторах

Alam Michel – аспирант кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: michelalam@gmail.com

Носников Вадим Валерьевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: nosnikov@belstu.by

Received 15.03.2023

ЛЕСОЗАЩИТА И САДОВО-ПАРКОВОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

FOREST PROTECTION AND LANDSCAPING

УДК 632.08;581.2;632.4

В. Г. Блох¹, В. Б. Звягинцев²

¹Полесский государственный университет

²Белорусский государственный технологический университет

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНГИЦИДОВ ПРОТИВ БОЛЕЗНЕЙ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ ПРИ ИХ ВВЕДЕНИИ МЕТОДОМ СТВОЛОВЫХ ИНЪЕКЦИЙ

В статье представлены результаты предварительной оценки возможности подавления комплексных грибных инфекций древесных растений в зеленых насаждениях, имеющих важное историческое значение, путем стволовых инъекций фунгицидов. Препараты, содержащие в качестве действующих веществ тиофанат-метил, крезол-метил, флутриафол, тебуконазол были инъецированы в основание стволов деревьев клена остролистного (*Acer platanoides* L.), липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.) и липы крупнолистной (*Tilia platyphyllos* Scop.) одной возрастной категории в рядовом типе посадки. Биологическая эффективность оценивалась через 10 недель на примере подавления мучнистой росы (возбудитель *Uncinula aceris* (DC.) Sacc.), черной пятнистости (возбудитель *Rhytisma acerinum* (Pers.) Fr.) и темно-бурой пятнистости (возбудитель *Cercospora microsora* Sacc.) на ассимиляционном аппарате. Выявлено, что эффективность стволовых инъекций зависит от вводимого препарата, дозы действующего вещества, заболевания, степени поражения ассимиляционного аппарата, периода введения раствора. Прослежена тенденция изменчивости эффективности инъекций по высоте защищаемых растений, что, по-видимому, связано с особенностями распределения ксилемного тока. Полученные результаты с учетом существенного снижения экологических рисков за счет адресного введения препаратов предлагается положить в основу детального изучения возможности применения стволовых инъекций для повышения устойчивости ценных старовозрастных деревьев и их защиты от опасных болезней.

Ключевые слова: стволовые инъекции, фунгициды, ассимиляционный аппарат, черная пятнистость, мучнистая роса, темно-бурая пятнистость, биологическая эффективность.

Для цитирования: Блох В. Г., Звягинцев В. Б. Биологическая эффективность фунгицидов против болезней древесных растений при их введении методом стволовых инъекций // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 67–75. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-9.

V. G. Blokh¹, V. B. Zviagintsev²

¹Polessky State University

²Belarusian State Technological University

BIOLOGICAL EFFECTIVENESS OF FUNGICIDES AGAINST WOODY PLANTS DISEASES WHEN INTRODUCED BY STEM INJECTION METHOD

The article presents the results of a preliminary assessment of the possibility of suppressing complex fungal infections of woody plants in green spaces of great historical importance by stem injections of fungicides. Preparations containing thiophanate-methyl, cresol-methyl, flutriafol, tebuconazole as active ingredients were injected into the base of tree trunks of Norway maple (*Acer platanoides* L.), heart-shaped linden (*Tilia cordata* Mill.) and large-leaved linden (*Tilia platyphyllos* Scop.) one age category in an ordinary type of landing. Biological efficacy was evaluated after 10 weeks on the example of powdery mildew (pathogen *Uncinula aceris* (DC.) Sacc.), black spot (pathogen *Rhytisma acerinum* (Pers.) Fr.) and dark brown spot (pathogen *Cercospora microsora* Sacc.) on the assimilation machine. It was

revealed that the effectiveness of stem injections depends on the administered drug, the dose of the active substance, the disease, the degree of damage to the assimilation apparatus, the period of administration of the solution. The trend of variability in the effectiveness of injections along the height of protected plants was traced, which, apparently, is associated with the peculiarities of the distribution of the xylem current. The results obtained, taking into account a significant reduction in environmental risks due to the targeted administration of drugs, are proposed to be used as the basis for a detailed study of the possibility of using stem injections to increase the resistance of valuable old-growth trees and protect them from dangerous diseases.

Keywords: stem injections, fungicides, assimilation apparatus, black spot, powdery mildew, dark brown spot, biological effectiveness.

For citation: Blokh V. G., Zviagintsev V. B. Biological effectiveness of fungicides against woody plants diseases when introduced by stem injection method. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forest. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 67–75. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-9 (In Russian).

Введение. Исторические парки сохранились во многих населенных пунктах и старинных усадьбах Беларуси. Дендрофлора этих значимых элементов культурного наследия представлена богатым видовым составом старовозрастных растений, включающим не только местные виды деревьев и кустарников, но и широкий спектр интродуцентов. Основной ценностью исторических парков как объектов садово-паркового строительства являются старовозрастные деревья – живые свидетели минувших эпох. В силу возраста и условий эксплуатации парковых комплексов деревья поражаются инфекционными болезнями, теряют устойчивость и декоративность [1]. Распределение возбудителей грибных болезней на старовозрастных деревьях особо охраняемых территорий определяется особенностями формирования растительных комплексов в парковых ландшафтах, степенью антропогенного воздействия, повреждениями и степенью ослабленности растений [2].

Хронические грибные инфекции и, в частности, стволовые гнили приводят деревья к аварийному состоянию, угрожающему их безвозвратной утратой. Так, в ноябре 2022 г. в Спасском-Лутовинове в Орловской области из-за значительных разрушений корневой системы гнилевыми болезнями упал Тургеневский дуб возрастом около 200 лет. Он являлся главной реликвией усадьбы Тургенева и занял годом ранее первое место в конкурсе на лучшее дерево России.

Разрушительный зимний шторм в феврале 1990 г. уничтожил свыше 1500 деревьев на территории Версальского парка во Франции. Второй более разрушительный шторм в декабре 1999 г. повредил около 10 000 старовозрастных деревьев, в том числе посаженных Марией-Антуанеттой и Наполеоном, после чего французское правительство приступило к реализации широкомасштабного проекта ремонта и реконструкции [3]. Одной из причин масштабных

ветровалов названа пораженность деревьев болезнями.

Эти примеры демонстрируют, что в первую очередь во время ураганов и штормов страдают старовозрастные и ослабленные деревья, поэтому основная задача повысить их устойчивость и сохранить такие деревья для будущих поколений.

Основными методами защиты дендросоциологии в старинных парках являются агротехнические (удаление опавшей хвои и листьев, подкормка, опрыскивание стимуляторами, уборка плодовых тел трутовиков и др.); физико-механические (санитарная и омолаживающая обрезки, рубки прореживания, антисептирование ран и повреждений, лечение дупел и др.); химические (микроинъекции, опрыскивание пестицидами и др.); интегрированные (оптимальное сочетание всех возможных методов защиты) [4].

На основании литературных источников было определено, что для старовозрастных деревьев наиболее перспективным является химический метод защиты. Традиционное внесение средств защиты растений путем опрыскивания старовозрастных деревьев достаточно трудоемко и технически сложно реализуемо по причине размеров, а зачастую и месторасположения, не позволяющего распылять пестициды, например в населенных пунктах. Поэтому нами был рассмотрен метод стволовых микроинъекций, позиционирующийся в литературе как эффективная обработка ценных деревьев [5]. Стволовые инъекции являются перспективным методом лечения, позволяющим осуществлять быструю доставку препарата непосредственно в проводящую систему, что невозможно сделать при других видах обработки. Например, при защите генеративных органов ели от насекомых-конобионтов инъекции показали хороший результат [6].

Преимущества метода стволовых инъекций заключаются в следующем:

– снижение расхода пестицидов из-за отсутствия нецелевого использования (попадания на почву, сноса, испарения, смыва и т. п.);

– возможность использования в городской среде, так как действующее вещество попадает только внутрь растения, не загрязняет почву и воздух, не оказывает прямого воздействия на людей, птиц и полезных насекомых;

– повышение устойчивости растений инъекциями пестицидов при введении их в комбинации с витаминами и стимуляторами роста.

Особенности метода стволовых инъекций:

– скорость поглощения инъекционных растворов выше в ясные дни в период физиологической активности дерева, поскольку в дождливые дни и в период зимнего покоя происходит замедление транспирации;

– перспективен для индивидуального лечения ценных экземпляров деревьев ввиду своей высокой трудоемкости и стоимости;

– инъекции не проводят для лечения молодых деревьев с диаметром ствола меньше 10 см на высоте 1,3 м;

– лечение с помощью инъекции не должно проходить под высоким давлением и с использованием раствора высокой концентрации пестицидов, таким образом можно повредить дерево;

– при ежегодной постановке инъекции места для них располагают в шахматном порядке;

– раны обязательно закрываются антисептическими замазками [7–18].

Целью данных исследований являлась оценка фунгицидной эффективности стволовых инъекций на примере подавления развития микогенных патологий ассимиляционного аппарата древесных растений.

Основная часть. Объектами исследования являлись клен остролистный (*Acer platanoides* L.), липа сердцевидная (*Tilia cordata* Mill.) и липа крупнолистная (*Tilia platyphyllos* Scop.) одной возрастной категории в рядовом типе посадки на территории студенческого городка в филиале Белорусского государственного технологического университета «Негорельский учебно-опытный лесхоз». Выбор модельных объектов обоснован повсеместным использованием данных видов в посадках исторических парков. Средняя высота модельных деревьев клена составляла 14,2 м, а лип – 18,5 м. В летний период под деревьями регулярно проводилось удаление опавшей листвы и по необходимости санитарная обрезка.

Стволовые инъекции производили в начале вегетации (12 мая 2022 г.), препараты вводили в основание ствола опытных деревьев на высоте около 10 см от земли. Окружность ствола делили на 10 секторов в каждом из которых сверлилось отверстие диаметром 8 мм, глубиной 50 мм с

уклоном около 30° вниз от горизонтали. Для проведения стволовой инъекции использовали инъекционный шприц объемом 50 мл, раствор вводился под давлением руки. В качестве фунгицида для стволовых инъекций *A. platanoides* использовали Боливар Форте, КС с д. в. тебуконазол (240 г/л) и крезоксим-метил (125 г/л). В качестве фунгицида для стволовых инъекций *T. cordata* и *T. platyphyllos* использовали Боливар Форте, КС и Формат Экстра, КС с д. в. тиофанат-метил (310 г/л) и флутриафол (187 г/л). Во всех случаях препараты были разведены дистиллированной водой в соотношении 1 : 3. После проведения инъекций отверстия герметизировали садовым варом.

Через 10 недель после инъектирования на каждом дереве из трех частей кроны (нижняя, средняя, верхняя) были собраны по три экземпляра ветвей с 6–30 листьями на каждой. Листовые пластинки подвергались осмотру и определению относительной площади покрытия ассимиляционного аппарата доминирующими болезнями – мучнистой росой (возбудитель *Uncinula aceris* (DC.) Sacc.), черной пятнистостью (возбудитель *Rhytisma acerinum* (Pers.) Fr.) и темно-бурой пятнистостью (возбудитель *Cercospora microsora* Sacc.).

Статистическая обработка полученных экспериментальных данных проводилась по методикам Б. А. Доспехова в пакете прикладных математических программ Statistica 10.0 и Microsoft Excel 2016. Для расчета биологической эффективности использовалась формула Аббота (1), которая интегрирует влияние факторов, определяющих естественную гибель в контроле:

$$БЭ = \left[\frac{К - 0}{К} \right] \cdot 100,$$

где БЭ – биологическая эффективность; К – развитие (пораженность) болезни в контроле (без обработки); 0 – развитие (пораженность) болезни в испытываемом варианте после обработки [19].

Измерение диаметра ствола на высоте 1,3 м и в области инъекции осуществлялось с помощью мерной вилки; категории состояния растений оценивались по внешним признакам согласно шкале категорий состояния хвойных и лиственных деревьев (постановление Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь от 19.12.2016 № 79 «Санитарные правила в лесах Республики Беларусь»). Для идентификации возбудителей болезни и степени пораженности ассимиляционного аппарата использовали макроскопический анализ. В приведенных расчетах применяли величину доверительной вероятности P , равную 95%, соответствующий ей уровень значимости q , равный 5%, и ошибку $3S$. Грубые ошибки исключали по критерию Стьюдента.

Таблица 1

**Биологическая эффективность стволовых инъекций на *Acer platanoides* L.
против мучнистой росы и черной пятнистости**

Номер дерева	Категория состояния	Диаметр на высоте 1,3 м, см	Диаметр в области инъекции, см	Объем вводимого раствора, мл	Действующее вещество (количество на дерево, г)	$M \pm m$ % черной пятнистости от площади листа	$M \pm m$ % мучнистой росы от площади листа	Биологическая эффективность, %	
								по черной пятнистости	по мучнистой росе
1	2-я	29	37	62	Тебуконазол (3,7), крезоксим-метил (1,9)	$0,72 \pm 0,26$	$1,50 \pm 0,33$	87,23	65,44
2	2-я	28	34	58	Тебуконазол (3,5), крезоксим-метил (1,8)	$1,40 \pm 0,57$	$2,45 \pm 0,55$	75,18	43,55
3	2-я	26	30	50	Тебуконазол (3,0), крезоксим-метил (1,6)	$1,71 \pm 0,60$	$1,70 \pm 0,54$	69,68	60,83
Контроль	2-я	28	35	–	–	$5,64 \pm 1,11$	$4,34 \pm 0,97$	–	–

Примечание. M – среднее арифметическое значение, m – стандартная ошибка средних.

Полученные результаты показали заметное фунгицидное воздействие препаратов, вводимых путем стволовых инъекций, на всех изучаемых видах деревьев. Биологическая эффективность Боливар Форте, КС на *A. platanoides* составляла 60,83–65,44% по мучнистой росе и 69,68–87,23% по черной пятнистости (табл. 1). Кроме снижения площади инфекционных пятен на листьях отмечена задержка в формировании стромы возбудителя – гриба *R. acerinum* по сравнению с контролем.

По высоте кроны отмечена широкая вариабельность развития индикаторных болезней (рис. 1–2).

Так, при инъектировании клена Боливаром Форте, КС проявился достаточно равномерный фунгицидный эффект с небольшой тенденцией снижения эффективности в верхней части кроны. Это может свидетельствовать о

понижении содержания фунгицида при акропетальном токе до низкотоксичной концентрации для возбудителя *R. acerinum*. В то же время против мучнистой росы клена Боливар Форте, КС на тех же растениях и учетных ветвях показал меньшую эффективность в средней части кроны и более высокую в верхней. В целом по мучнистой росе биологическая эффективность препарата оказалась ниже и составляла по модельным деревьям от 43,55 до 65,44%, возможно это связано с большей толерантностью *U. aceris* к применяемым д. в. Устойчивость мучнисторосяных грибов рода *Uncinula* к некоторым группам фунгицидов хорошо известна в научной литературе [20]. Обычно ее связывают с появлением резистентных рас фитопатогенов [21] и закреплением новых положительных мутаций [22].

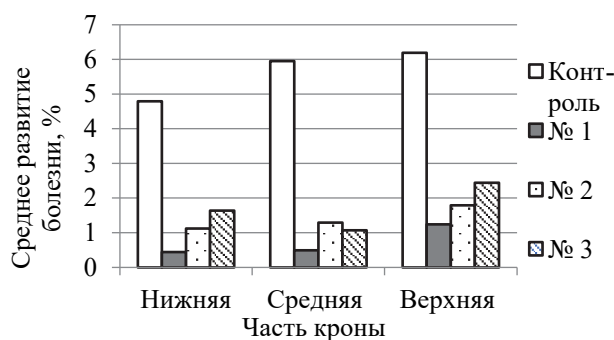


Рис. 1. Среднее развитие черной пятнистости листьев клена остролистного в различных частях кроны после инъектирования Боливар Форте, КС

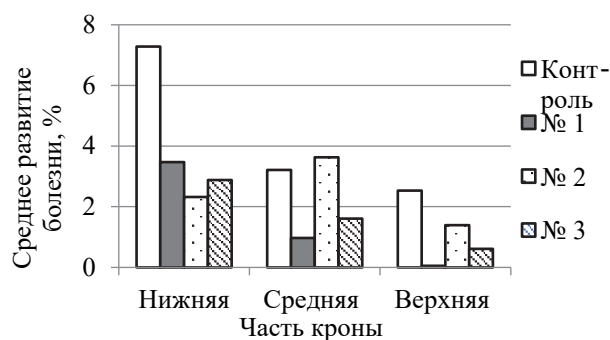


Рис. 2. Среднее развитие мучнистой росы листьев клена остролистного в различных частях кроны после инъектирования Боливар Форте, КС

Таблица 2

**Биологическая эффективность стволовых инъекций на *Tilia cordata* Mill.
против темно-бурой пятнистости**

Номер дерева	Категория состояния	Диаметр на высоте 1,3 м, см	Диаметр в области инъекции, см	Объем вводимого раствора, мл	Действующее вещество (количество на дерево, г)	$M \pm m$ % темно-бурой пятнистости от площади листа	Биологическая эффективность по темно-бурой пятнистости, %
1	1-я	46	51	60	Тебуконазол (3,6), крезоксим-метил (1,9)	$1,09 \pm 0,23$	68,68
2	2-я	48	56	60	Тебуконазол (3,6), крезоксим-метил (1,9)	$1,43 \pm 0,31$	58,91
3	2-я	36	50	50	Тиофанат-метил (3,9), флутриафол (2,3)	$2,99 \pm 0,32$	14,08
Контроль	2-я	40	45	–	–	$3,48 \pm 0,43$	–

На более массивных по сравнению с кленом деревьях липы сердцевидной стволовые инъекции фунгицидом «Боливар Форте, КС» показали среднюю биологическую эффективность по темно-бурой пятнистости 58,91 и 68,68%, что оказалось существенно выше по сравнению с фунгицидом «Формат Экстра, КС», который снизил развитие болезни в среднем только на 14,08% (табл. 2). Как показано на рис. 3, последний препарат проявил активность только в нижней части кроны модельного дерева, тогда как Боливар Форте, КС дал приблизительно равномерный фунгицидный эффект по всей кроне, снижая развитие болезни на 50–70%. Темно-бурая пятнистость листьев липы сердцевидной, вызываемая *S. microsora*, сложно поддается контролю современными пестицидами и при традиционной обработке путем опрыскивания [23].

Анализ данных показал, что внутрирастительное введение препаратов в стволы деревьев сохраняет фунгицидную активность даже спустя

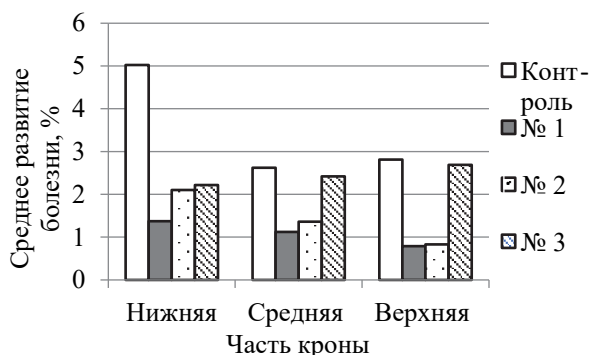


Рис. 3. Среднее развитие темно-бурой пятнистости листьев липы сердцевидной в различных частях кроны после инъектирования Боливар Форте, КС (№ 1, 2) и Формат Экстра, КС (№ 3)

10 недель после обработки. При традиционном способе защиты растений путем опрыскивания продолжительность действия препаратов существенно ниже. Имеются сведения, что, например, в яблоневых садах крезоксим-метил разлагается до концентраций, которые ниже предела количественного обнаружения (0,04 мг/кг), за 10 суток после последней из трех обработок, т. е. дезактивируется [24]. Полевые испытания стойкости тебуконазола показали, что снижение его концентрации за первые 3 дня происходит на 70% [25]. Таким образом, можно констатировать существенное пролонгирование действия пестицидов при их введении методом стволовых инъекций.

Очевидно, что для получения более высокой эффективности на *T. cordata* необходимо увеличивать количество вносимого препарата за счет повышения его концентрации в рабочей жидкости либо увеличения объема вводимого раствора.

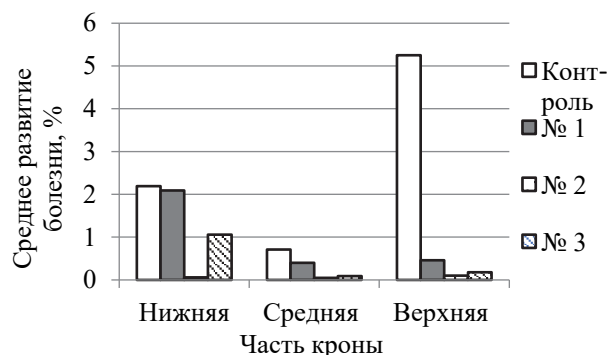


Рис. 4. Среднее развитие темно-бурой пятнистости листьев липы крупнолистной в различных частях кроны после инъектирования Боливар Форте, КС (№ 1) и Формат Экстра, КС (№ 2, 3)

Таблица 3

**Биологическая эффективность стволовых инъекций на *Tilia platyphyllos* Scop.
против темно-бурой пятнистости**

Номер дерева	Категория состояния	Диаметр на высоте 1,3 м, см	Диаметр в области инъекции, см	Объем вводимого раствора, мл	Действующее вещество (количество на дерево, г)	$M \pm m$ % темно-бурой пятнистости от площади листа	Биологическая эффективность по темно-бурой пятнистости, %
1	1-я	35	40	60	Тебуконазол (3,6), крезоксим-метил (1,9)	0,98 ± 0,24	63,70
2	2-я	34	41	50	Тиофанат-метил (3,9), флутриафол (2,3)	0,10 ± 0,02	95,51
3	2-я	36	50	85	Тиофанат-метил (6,6), флутриафол (4,0)	0,44 ± 0,09	83,70
Контроль	2-я	35	41	–	–	2,70 ± 0,76	–

На деревьях липы крупнолистной стволовые инъекции фунгицидом «Формат Экстра, КС» с действующими веществами тиофанат-метилом и флутриафолом показали, напротив, более высокую биологическую эффективность по темно-бурой пятнистости в сравнении с препаратом «Боливар Форте, КС» (табл. 3). Развитие пятнистости листьев на модельных деревьях удалось снизить с помощью препарата «Формат Экстра, КС», содержащего разные дозы действующего вещества, в среднем на 83,7 и 95,51% соответственно, что достаточно для надежного контроля заболевания. Эффективность существенно варьировала по высоте кроны, однако четких тенденций изменчивости не проявлялось (рис. 4). Стоит лишь отметить, что наименьшая биологическая эффективность была выявлена в варианте с Боливар Форте, КС в нижней части кроны.

Заключение. Стволовые инъекции являются перспективным методом индивидуального лечения старовозрастных деревьев, представляющим особую ценность при защите уникальных экземпляров на урбанизированных территориях. В оценку эффективности стволовых инъекций следует включить их воздействие на развитие наиболее опасных хронических инфекционных болезней старовозрастных деревьев – гнилей, некрозов, раковых заболеваний, которые наиболее распространены в исторических парках и являются важнейшими объектами контроля.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Внутривитальное введение системных препаратов в комлевую часть стволов защищаемых деревьев в период активного сокодвижения позволяет повысить устойчивость ассимиляционного аппарата к инфекционным заболеваниям по всей кроне крупных деревьев исключая нецелевой расход пестицидов и их попадание в окружающую среду.

2. Препараты, внесенные путем стволовых инъекций, проявляют более пролонгированное действие по сравнению с поверхностной обработкой путем опрыскивания, сохраняют фунгицидную активность на срок не менее 10 недель.

3. Биологическая эффективность стволовых инъекций зависит от вводимого препарата, количества действующего вещества, степени поражения ассимиляционного аппарата, высоты и, возможно, объема кроны.

4. Судя по разбросу результатов данного предварительного опыта, для оценки оптимальных параметров инъекций необходимо варьировать видом и количеством вводимых действующих веществ, их концентрацией в рабочей жидкости, методикой и инструментарием инъектирования.

5. Имеется необходимость в разработке технологий проведения стволовых инъекций и испытаний в рамках государственной регистрации препаратов под этот метод внесения пестицидов.

Список литературы

1. Блох В. Г., Звягинцев В. Б. Фитосанитарное состояние дендрофлоры исторических парков Пинского района // Весн. Палес. дзярж. ун-та. Сер. прыродазнаўчых навук: навук.-практ. часоп. 2022. № 1. С. 3–11.
2. Блох В. Г., Звягинцев В. Б. Фитосанитарное состояние *Acer platanoides* L., *Tilia cordata* Mill., *Quercus robur* L. в исторических парках Белорусского Полесья // Мониторинг и биологические

методы контроля вредителей и патогенов древесных растений: от теории к практике: материалы III Всерос. конф. с междунар. участием, Москва, 11–15 апр. 2022 г. М., 2022. С. 24–25.

3. Maroteaux V., J. de Givry. Versailles – le Grand Parc. Les Loges-en-Josas: JDG Publ., 2004. 240 p.
4. Сокольская О. Б. Обоснование восстановления садово-паркового наследия России. СПб.: Лань, 2021. 368 с.
5. Блох В. Г., Звягинцев В. Б. О фунгицидной эффективности ствольных инъекций // Лесное хозяйство: материалы 87-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 31 января – 17 февраля 2023 г. Минск, 2023. С. 62–65.
6. Южик Н. В., Звягинцев В. Б. Эффективность метода внутривольной инъекции для защиты генеративных органов ели от насекомых-конобионтов // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. Ин-та леса НАН Беларуси. Гомель, 2012. Вып. 72. С. 503–508.
7. Soloneski S., Larramendy M. L. Insecticides – basic and other applications // IntechOpen. URL: <https://www.intechopen.com/books/2035> (date of access: 08.10.2022).
8. Berger C., Laurent F. Trunk injection of plant protection products to protect trees from pests and diseases // Crop Protection. 2019. Vol. 124. P. 104831. DOI: 10.1016/j.cropro.2019.05.025.
9. Exploring alternatives to tree injection / T. O. Perry [et al.] // Arboriculture & Urban Forestry. 1991. Vol. 17, issue 8. P. 217–226.
10. Navarro C., Fernandez-Escobar R., Benloch M. A low-pressure, trunk-injection method for introducing chemical formulations into olive trees // J. Amer. Soc. Hort. Sci. 1992. Vol. 117 (2). P. 357–360.
11. Zamora M. A. S., Escobar R. F. Injector-size and the time of application affects uptake of tree trunk-injected solution // Scientia Horticulturae. 2000. Vol. 84. P. 163–177.
12. Evaluation of trunk injections for control of emerald ash borer / D. G. McCullough [et al.] // Proceedings of the emerald ash borer research and development meeting, Morgantown, 2004 October 5–6. Morgantown, WV, 2005. P. 38–39.
13. Pegg K. G. Tree injection methodology // Australasian Plant Pathology. 1990. Vol. 19 (4). P. 142–143.
14. Seasonal and cross-seasonal timing of fungicide trunk injection in apple trees to optimize management of apple scab / Srđan G. Aćimović [et al.] // Plant Disease. 2016. Vol. 100, no. 8. P. 1606–1616.
15. Дорофеева Т. Б. Анализ состояния городских зеленых насаждений в Пушкинском районе Санкт-Петербурга // Биосфера. 2012. Т. 4, № 2. С. 158–166.
16. Wasniewski T. A., Chaney W. R., Holt H. A. Hole angle for trunk injection of tree growth regulators and its effect on weeping, wound closure and wood discoloration // Journal of Arboriculture. 1993. Vol. 19 (3). P. 131–138.
17. Spatial and temporal distribution of trunk-injected ¹⁴C-imidacloprid in *Fraxinus* trees / S. R. Tanis [et al.] // Pest Management Science. 2012. Vol. 68. P. 529–536.
18. Blicharska M., Mikusinski G. Incorporating social and cultural significance of large old trees in conservation policy // Conservation Biology. 2014. Vol. 28, issue 6. P. 1558–1567.
19. Методические указания по регистрационным испытаниям фунгицидов в сельском хозяйстве / Науч.-практ. центр НАН Беларуси по земледелию, Ин-т защиты растений. Несвиж: Несвижская укрупненная типография, 2007. 508 с.
20. Development and morphology of *Uncinula necator* following treatment with the fungicides kresoxim-methyl and penconazole / G. M. E. Leinhos [et al.] // Mycological Research. 1997. Vol. 101, issue 9. P. 1033–1046.
21. Erickson E. O., Wilcox W. F. Distributions of sensitivities to three sterol demethylation inhibitor fungicides among populations of *Uncinula necator* sensitive and resistant to triadimefon // Phytopathology. 1997. Vol. 87, no. 8. P. 784–791.
22. Delye C., Laigret F., Corio-Costet M. F. A mutation in the 14 alpha-demethylase gene of *Uncinula necator* that correlates with resistance to a sterol biosynthesis inhibitor // Applied and Environmental Microbiology. 1997. Vol. 63, no. 8. P. 2966–2970.
23. Эффективность защитных мероприятий против пятнистостей лиственных пород, используемых в озеленении городов / Э. И. Коломиец [и др.] // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2010. Вып. XVIII. С. 339–343.
24. Епихина Т. С., Поддымкина Л. М. Оценка уровня загрязнения остаточными количествами крезоксим-метила в плодах семечковых культур методом газожидкостной хроматографии // Высокие технологии в растениеводстве – научная основа развития АПК: сб. ст. по итогам студ. науч.-практ. конф., Москва, 21 апр. 2021 г. М., 2021. С. 67–70.
25. Dissipation and adsorption of isoproturon, tebuconazole, chlorpyrifos and their main transformation products under laboratory and field conditions / E. S. Papadopoulou [et al.] // Science of the Total Environment. 2016. Vol. 569–570. P. 86–96.

References

1. Blokh V. G., Zviagintsev V. B. Phytosanitary state of the dendroflora of the historical parks of the Pinsk region. *Vesnik Paleskaga dzyarzhavnaga universiteta* [Bulletin of Polesky State University], Natural Sciences series, 2022, no. 1, pp. 3–11 (In Russian).
2. Blokh V. G., Zviagintsev V. B. Phytosanitary status of *Acer platanoides* L., *Tilia cordata* Mill., *Quercus robur* L. in the historical parks of Belarusian Polesia. *Monitoring i biologicheskiye metody kontrolya vreditel'ey i patogenov drevesnykh rasteniy: ot teorii k praktike: materialy Tret'yey Vserossiyskoy konferentsii* [Monitoring and biological methods of control of pests and pathogens of woody plants: from theory to practice: materials of the Third All-Russian Conference with International Participation]. Moscow, 2022, pp. 24–25 (In Russian).
3. Maroteaux V., J. de Givry. Versailles – le Grand Parc. Les Loges-en-Josas, JDG Publ., 2004. 240 p. (In French).
4. Sokolskaya O. B. *Obosnovaniye vosstanovleniya sadovo-parkovogo naslediya Rossii* [Rationale for the restoration of the garden and park heritage of Russia]. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2021. 368 p. (In Russian).
5. Blokh V. G., Zviagintsev V. B. On the fungicidal efficacy of stem injections. *Lesnoye khozyaystvo: materialy 87-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Forestry: materials of the 87th scientific and technical conference of the faculty, researchers and graduate students]. Minsk, 2023 (In Russian).
6. Yuzhik N. V., Zviagintsev V. B. Efficiency of intrastem injection method for protection of generative organs of spruce from conobiont insects. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva: sbornik nauchnykh trudov Instituta lesa Natsional'noy akademii nauk Belarusi* [Problems of forest science and forestry: a collection of scientific papers of the Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus]. Gomel, 2012, issue 72, pp. 503–508 (In Russian).
7. Soloneski S., Larramendy M. L. Insecticides – basic and other applications. Available at: <https://www.intechopen.com/books/2035> (accessed 08.10.2022).
8. Berger C., Laurent F. Trunk injection of plant protection products to protect trees from pests and diseases. *Crop Protection*, 2019, vol. 124, p. 104831. DOI: 10.1016/j.cropro.2019.05.025.
9. Perry T. O., Santamour F. S., Stipes R. J., Shear T., Shigo A. L. Exploring alternatives to tree injection. *Arboriculture & Urban Forestry*, 1991, vol. 17, issue 8, pp. 217–226.
10. Navarro C., Fernandez-Escobar R., Benlloch M. A low-pressure, trunk-injection method for introducing chemical formulations into olive tress. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 1992, vol. 117 (2), pp. 357–360.
11. Zamora M. A. S., Escobar R. F. Injector-size and the time of application affects uptake of tree trunk-injected solution. *Scientia Horticulturae*, 2000, vol. 84, pp. 163–177.
12. McCullough D. G., Poland T. M., Cappert D. L., Lewis Ph., Mologowski J. Evaluation of trunk injections for control of emerald ash borer. Proceedings of the emeralds ash borer research and development meeting, Morgantown, WV, 2005, pp. 38–39.
13. Pegg K. G. Tree injection methodology. *Australasian Plant Pathology*, 1990, vol. 19 (4), pp. 142–143.
14. Aćimović S. G., Van Woerkom A. H., Garavaglia T., Vandervoot Ch., Sundin G. W., Wise J. C. Seasonal and cross-seasonal timing of fungicide trunk in apple trees to optimize management of apple scab. *Plant Disease*, 2016, vol. 100, no. 8, pp. 1606–1616.
15. Dorofeeva T. B. Analysis of the state of urban green spaces in the Pushkinsky district of St. Petersburg. *Biosfera* [Biosphere], 2012, vol. 4, no. 2, pp. 158–166 (In Russian).
16. Wasniewski T. A., Chaney W. R., Holt H. A. Hole angle for trunk injection of tree growth regulators and its effect on weeping, wound closure and wood discoloration. *Journal of Arboriculture*, 1993, vol. 19 (3), pp. 131–138.
17. Tanis S. R., Bert M. G., Mota-Sanchez D., McCullough D. G., Poland T. M. Spatial and temporal distribution of trunk-injected ¹⁴C-imidacloprid in *Fraxinus* trees. *Pest Management Science*, 2012, vol. 68, pp. 529–536.
18. Blicharska M., Mikusinski G. Incorporating social and cultural significance of large old trees in conservation policy. *Conservation Biology*, 2014, vol. 28, issue 6, pp. 1558–1567.
19. *Metodicheskiye ukazaniya po registratsionnym ispytaniyam fungitsidov v sel'skom khozyaystve* [Guidelines for registration testing of fungicides in agriculture]. Nesvizh, Nesvizhskaya ukрупnennaya tipografiya Publ., 2007. 508 p. (In Russian).
20. Leinhos G. M. E., Gold R. E., Düggelein M., Guggenheim R. Development and morphology of *Uncinula necator* following treatment with the fungicides kresoxim-methyl and penconazole. *Mycological Research*, 1997, vol. 101, issue 9, pp. 1033–1046.
21. Erickson E. O., Wilcox W. F. Distributions of sensitivities to three sterol demethylation inhibitor fungicides among populations of *Uncinula necator* sensitive and resistant to triadimefon. *Phytopathology*, 1997, vol. 87, no. 8, pp. 784–791.

22. Delye C. A., Laigret F., Corio-Costet M. F. A mutation in the 14 alpha-demethylase gene of *Uncinula necator* that correlates with resistance to a sterol biosynthesis inhibitor. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, vol. 63, no. 8, pp. 2966–2970.

23. Kolomiets E. I., Grigortsevich L. N., Zviagintsev V. B., Nikonchik A. D., Sverchkova N. V. Efficiency of protective measures against leaf spots used in urban greening. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series I, Forestry, 2010, pp. 339–343 (In Russian).

24. Epikhina T. S., Poddymkina L. M. Evaluation of the level of contamination with residual amounts of kresoxim-methyl in fruits of pome crops by gas-liquid chromatography. *Vysokiye tekhnologii v ras-teniyevodstve – nauchnaya osnova razvitiya APK: sbornik statey po itogam studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [High technologies in crop production – the scientific basis for the development of the agro-industrial complex: a collection of articles based on the results of a student scientific and practical conference]. Moscow, 2021, pp. 67–70 (In Russian).

25. Papadopoulou E. S., Karas P. A., Nikolaki S., Storck V., Ferrari F., Trevisan M., Tsiamis G., Martin-Laurent F., Karpouzas D. G. Dissipation and adsorption of isoproturon, tebuconazole, chlorpyrifos and their main transformation products under laboratory and field conditions. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 569–570, pp. 86–96.

Информация об авторах

Блох Валентина Геннадьевна – ассистент кафедры ландшафтного проектирования. Полесский государственный университет (225710, г. Пинск, ул. Днепровской флотилии, 23, Республика Беларусь). E-mail: bloh.v@polessu.by

Звягинцев Вячеслав Борисович – кандидат биологических наук, доцент кафедры лесозащиты и древесиноведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: mycolog@tut.by

Information about the authors

Blokh Valentina Gennadievna – Assistant Lecture, the Department of Landscape Design. Polesky State University (23, Dneprovskoy flotilii str., 225710, Pinsk, Republic of Belarus). E-mail: bloh.v@polessu.by

Zviagintsev Viacheslav Borisovich – PhD (Biology), Associate Professor, the Department of Forest Protection and Wood Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mycolog@tut.by

Поступила 15.03.2023

УДК 625.77:632.78(476-21)

А. С. Рогинский, Ю. В. Анацко, С. В. Буга
Белорусский государственный университет

**ОЦЕНКА ЗАТРАТ НА ЗАМЕНУ КОНСКОГО КАШТАНА ОБЫКНОВЕННОГО
В ЗЕЛЕННЫХ НАСАЖДЕНИЯХ МИНСКА ДРЕВЕСНЫМИ ПОРОДАМИ,
УСТОЙЧИВЫМИ К ПОВРЕЖДЕНИЮ ИНВАЗИВНЫМИ МИНЕРАМИ**

Конский каштан обыкновенный (*Aesculus hippocastanum* Linnaeus, 1753) широко распространен в зеленых насаждениях населенных пунктов Республики Беларусь. В настоящее время в Минске примерно каждое пятое дерево в посадках – это конский каштан. Каштановая минирующая моль (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) является чужеродным для фауны Беларуси, широко распространенным вредителем *A. hippocastanum*, включенным в «Черную книгу инвазивных видов животных Беларуси». Личинки *C. ohridella* развиваются в минах – камерах в мезофилле листовых пластинок *A. hippocastanum*. В отсутствие мероприятий по контролю популяции вредителя посадки конского каштана утрачивают декоративность уже во второй половине лета, экономически и экологически приемлемые способы контроля популяций *C. ohridella* отсутствуют. Конский каштан обыкновенный более не используется при закладке новых зеленых насаждений, и ставится вопрос о его замене в существующих. В статье представлены расчеты ориентировочных затрат на изъятие 300 тыс. деревьев конского каштана обыкновенного из насаждений (от 20,0 до 1039,2 млн руб.), приобретение (от 1,5 до 504,0 млн руб.) и посадку (от 4,3 до 36,3 млн руб.) саженцев устойчивых к повреждению инвазивными минерами древесных пород для Минска, оцениваемые в сумму от 25,8 до 1579,5 млн руб.

Ключевые слова: *Cameraria ohridella*, *Aesculus hippocastanum*, Беларусь, минирующие насекомые, резистентность, чужеродные виды.

Для цитирования: Рогинский А. С., Анацко Ю. В., Буга С. В. Оценка затрат на замену конского каштана обыкновенного в зеленых насаждениях Минска древесными породами, устойчивыми к повреждению инвазивными минерами // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 76–86. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-10.

A. Roginsky, Yu. Anatsko, S. Buga
Belarusian State University

**ESTIMATED COSTS FOR REPLACING THE COMMON HORSE CHESTNUT
IN THE GREEN AREAS OF MINSK CITY WITH TREES
RESISTANT TO DAMAGE BY INVASIVE MINER PESTS**

At present, horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* Linnaeus, 1753) is common in green plantings in settlements of the Republic of Belarus, in Minsk, approximately every fifth tree in green stands is the horse chestnut one. *Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986 (Insecta: Lepidoptera: Gracillariidae), the chestnut leafminer moth, is a widespread pest of *A. hippocastanum*. The species is alien to the fauna of Belarus and included in the Black Book of Invasive Animal Species of Belarus. *C. ohridella* larvae live in mines in the mesophyll of horse chestnut leaf blades. In the absence of pest control measures, horse chestnut plantations lose their aesthetic value already in the second half of summer, and there are no economically and environmentally acceptable measures to control populations of *C. ohridella*. Common horse chestnut is no longer used in creating planting spaces, and the question is raised of replacing horse chestnut trees in existing ones. The article presents calculations of estimated costs for the removal of 300 thousand horse chestnut trees from green stands (from 20.0 to 1039.2 million rubles), purchase (from 1.5 to 504.0 million rubles) and planting (from 4.3 to 36.3 million rubles) of seedlings of tree species resistant to damage by invasive mining pests for the city of Minsk, estimated at 25.8 to 1579.5 million rubles.

Keywords: *Cameraria ohridella*, *Aesculus hippocastanum*, Belarus, leaf-mining insects, pest resistance, alien species.

For citation: Roginsky A., Anatsko Yu., Buga S. Estimated costs for replacing the common horse chestnut in the green areas of Minsk city with trees resistant to damage by invasive miner pests. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 76–86. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-10 (In Russian).

Введение. Биологические инвазии представляют собой одну из основных глобальных экологических проблем современности, весьма актуальны они и для Республики Беларусь [1]. Чужеродные виды, инвазии которых имеют серьезные негативные экономические, экологические и/или социальные последствия, подлежат включению в «Черные списки» или «Черные книги». А в нашей стране «Черная книга инвазивных животных Беларуси» впервые была издана в 2016 г. [2]; второе, переработанное и дополненное издание вышло в свет в 2020 г. [3]. Исследования в данном направлении координируются Центром инвазивных видов при ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам», который поддерживает тематическую on-line базу данных [4].

Каштановая минирующая моль, или охридский минер (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimić, 1986), представляет собой чужеродный для фауны Беларуси и Центральной Европы в целом вид минирующих молей семейства Gracillariidae (Lepidoptera). В настоящее время это основной вредитель конского каштана обыкновенного (*Aesculus hippocastanum* L.), его гибридов и садовых форм как в нашей стране, так и в зарубежной Европе [5, 6]. Данная древесная порода первоначально была характерна лишь для отдельных горных долин юго-запада Балканского полуострова [7], но в настоящее время широко

используется в зеленых насаждениях благодаря высокой декоративности крон и канделябромобразных соцветий (рис. 1).

Первичный ареал каштановой минирующей моли как специализированного фитофага был ограничен локальными местопроизрастаниями *A. hippocastanum* на Балканах [8], откуда минер был завезен в 1989 г. в Австрию [9], а затем распространился практически по всему вторичному ареалу конского каштана обыкновенного в Европе [10]. Хронологию экспансии инвайдера по Центральной и Восточной Европе отражает рис. 2.

Границ Республики Беларусь инвайдера предположительно достиг в 2001–2002 гг. [10] и, как свидетельствуют результаты выполнявшихся нами маршрутных обследований, к 2013 г. завершил экспансию по территории страны [11].

В ходе реализации своего жизненного цикла *C. ohridella* проходит стадии яйца, личинки (6 возрастов), куколки и имаго.

Личинки развиваются в листовых минах, поврежденные участки листовых пластинок подвергаются хлоротизации, а затем некротизируются, утрачивая естественную окраску. При массовом размножении вредителя это ведет к потере кронами декоративности (рис. 3), снижению рекреационной ценности зеленых насаждений [12].



Рис. 1. Крона и соцветие конского каштана обыкновенного



Рис. 2. Схема экспансии каштановой минирующей моли по странам и регионам Центральной и Восточной Европы (● – пункт первоначальной регистрации инвайдера в окрестностях аэропорта г. Линц (Австрия))

В условиях Беларуси первые мины, а затем и локальное изменение естественного облика листвы и крон в целом регистрируются с конца июня. Зачастую имеет место досрочное опадение листвы, дефолиация крон начинается уже со второй половины июля, а в августе она приобретает массовый характер, генерируя проблему регулярной уборки опавшей листвы там, где уход за насаждениями практикуется в течение всего вегетационного сезона. Одним из опосредованных следствий вспышек массового размножения каштановой минирующей моли считается повторное цветение конского каштана в осенний период (рис. 4), сильно ослабляющее растения и ведущее к выпадению из насаждений наиболее пострадавших экземпляров [13, 14].

Описанные выше последствия повреждений декоративных насаждений конского каштана обыкновенного ставят под сомнение дальнейшее использование данной древесной породы в зеленом строительстве. При этом остается актуальным вопрос: что делать с уже имеющимися посадками? Обработки инсектицидами не рассматриваются в качестве приемлемого варианта защитных мероприятий для насаждений *A. hippocastanum*, они применимы для отдельных растений и локальных посадок, ввиду высокой трудоемкости технологического приема и

сложности доступа к удаленным (например, привершинным) участкам крон. Однако эта проблема может быть частично решена использованием другого метода экспликации препаратов, а именно инъекциями в ствол. Вследствие того, что эта дорогостоящая процедура должна повторяться ежесезонно, уход за посадками становится очень затратным [6]. Именно по этой причине данный метод не нашел применения в постсоветских странах, куда не импортируются приспособления для стволовых инъекций, отсутствуют регистрации пригодных для этих целей инсектицидов. Натурализация чужеродного для аборигенной фауны вида насекомых-фитофагов сопровождается формированием спектра новых биотических связей, в том числе с «естественными врагами» – паразитоидами и хищниками. Энтомофаги считаются потенциально эффективными регуляторами популяционной динамики фитофагов-вредителей.

В случае каштановой минирующей моли из ее первичного ареала не были описаны специализированные паразитоиды и хищники, натурализация инвайдера в странах Европы сопровождалась формированием комплекса паразитоидов, объединившего представителей аборигенной фауны, «переключающихся» на охридского минера по мере формирования все более многочисленных популяций вредителя [15–18].



Рис. 3. Участок зеленых насаждений до и после повреждения каштановой минирующей молью

При этом уровень смертности инвайдеров в результате активности паразитоидов низок (например, для липовой моли-пестрянки (*Phyllonorycter issikii* (Kumata, 1963)) в Удмуртии он составляет не более $1,6 \pm 0,3\%$ [19]), что определяет неспособность оказать сдерживающее воздействие на популяцию инвазивных видов молей-пестрянок, предупредить развитие вспышек их массового размножения, имеющих следствием существенную или катастрофическую потерю отдельными растениями и насаждениями декоративности. К аналогичным выводам ведут результаты выполнявшихся нами в 2018–2019 гг. исследований комплексов паразитоидов каштановой минирующей моли. Они показали, что эти энтомофаги обуславливают гибель 10,19–12,03% куколок как летней, так и осенней (зимующей) генераций *S. ohridella*. Это говорит о недостаточной их эффективности для удержания популяции вредителя на уровне численности ниже пороговой, ведущей к потере растениями декоративности. Таким образом, ситуация в нашей стране в этом плане аналогична ранее сложившейся в Германии [19] и Италии [20], и деятельность энтомофагов, несмотря на всю привлекательность биологических методов защиты растений с экологической точки зрения, не может рассматриваться в качестве действенного ограничителя вредоносности каштановой минирующей моли в декоративных посадках.

Основная часть. Как уже указывалось выше, в настоящее время ставится вопрос о целесообразности использования конского каштана обыкновенного в зеленом строительстве. При этом возможно использование при проектировании новых и реконструкции имеющихся насаждений устойчивых к повреждению каштановой минирующей молью видов и гибридов конского каштана. В частности, каштан мясо-красный (*Aesculus × carnea* Zeyh., 1818) непригоден для развития личинок *S. ohridella* младших возрастов, тогда как каштан красный (*Aesculus pavia* L.), по данным источника [6], неспособен обеспечить

успешное развитие личинок старших возрастов. Наши исследования 2018–2019 гг. подтвердили высокую устойчивость *A. pavia* к данному вредителю в условиях Беларуси [21]. В ряде городов, например Вильносе, осуществлены посадки резистентных к фитофагу красноцветных конских каштанов с целью формирования устойчивых к инвайдеру насаждений.



Рис. 4. Повторное цветение конского каштана обыкновенного

Полная замена повреждаемых охридским минером конских каштанов устойчивыми древесными породами является весьма затратным мероприятием. Так, по сделанным в 2003 г. оценкам замена 30% конских каштанов в одном только Берлине обошлась бы в 300 млн евро [22], что и определило отказ от реализации данной дорогостоящей программы в полном объеме.

В Республике Беларусь наибольший объем работ по зеленому строительству и поддержанию в оптимальном состоянии существующих

декоративных насаждений выполняется в г. Минске. Зеленые насаждения города находятся в ведении КУП «Минскзеленстрой» и его подразделений (на 01.06.2019 на балансовый учет было поставлено 975 тыс. деревьев), а также территориальных подразделений служб жилищно-коммунального хозяйства г. Минска (на 31.12.2019 на учете здесь состояло около 430 тыс. деревьев). В последние годы в городе не выполнялись сколь-нибудь масштабные выборочные рубки конских каштанов, так что число произрастающих в зеленых насаждениях деревьев к настоящему времени существенно не изменилось.

Следует отметить, что древесные насаждения на территориях, находящихся в пользовании различных бюджетных, коммерческих и некоммерческих организаций, не каталогизированы и поэтому не могут быть охвачены расчетами. Таким образом, в разного типа зеленых насаждениях в Минске произрастает более 1 400 000 деревьев. Согласно оценкам специалистов [23, 24], доля конского каштана в структуре насаждений составляет 21,8%, что позволяет предположить наличие в них около 300 тыс. экземпляров конского каштана. Первым этапом замены должно стать изъятие растений из зеленых насаждений, включающее валку деревьев и раскорчевку пней (табл. 1).

Конский каштан принадлежит к числу древесных пород с мягкой древесиной [25]. Высота

большинства произрастающих в Минске экземпляров конского каштана обыкновенного, по нашим оценкам, составляет от 15 до 30 м, диаметр ствола от 5 до 85 см. Использование этих данных в online-калькуляторе [26] позволило оценить объем древесины подлежащих валке деревьев в диапазоне от 11 780 до 6 809 200 скл. м³ (1 скл. м³ \approx 0,75 м³ древесины).

Расчеты стоимости изъятия деревьев конского каштана обыкновенного из зеленых насаждений Минска проведены на основе действующих нормативных документов [27, 28] с использованием размещенной в сетевом доступе программы Smeta-OnLine [29] при разных вариантах валки деревьев и корчевки пней (с погрузо-разгрузочными работами) и представлены в табл. 1.

Таким образом, затраты на изъятие из существующих зеленых насаждений присутствующих в них деревьев конского каштана обыкновенного оценочно могут обойтись на сумму примерно от 20,0 до 1039,2 млн руб.

Согласно действующим нормативным актам [27, 28], изъятие деревьев должно быть опосредовано компенсационными посадками (табл. 2). Подготовка посадочных мест и посадка также потребуют соответствующих затрат. Результаты расчетов стоимости работ по выполнению компенсационных посадок в Минске для замещения изъятых деревьев конского каштана обыкновенного представлены в табл. 2.

Таблица 1

Расчетная стоимость работ по изъятию деревьев конского каштана обыкновенного в зеленых насаждениях Минска

Вид работ	Единица измерения	Ориентировочные расценки работ за единицу, руб.	Общая стоимость работ, руб.
Ручная валка деревьев мягкой породы в городских условиях	скл. м ³	От 28,71 до 50,13	От 338 203,80 до 341 345 196,00
Валка деревьев мягких пород по частям с применением автогидроподъемника в городских условиях	скл. м ³	От 724,44 до 949,88	От 853 390,32 до 646 792 289,60
Корчевка пней мягких пород вручную давностью рубки до трех лет	пень	От 56,3	От 16 890 000,00
Корчевка деревьев в грунтах естественного залегания корчевателями-собирающими на тракторе мощностью 79 кВт (108 л. с.) с трелевкой до 100 м	100 деревьев	От 639,98	От 1 919 940,00
Погрузочно-разгрузочные работы	м ³	От 6,91	От 61 049,85 до 32 288 679,00
Итого			От 20 062 584,00 до 1 039 236 104,60

Таблица 2

**Расчетная стоимость работ по выполнению компенсационных посадок
для замещения изъятых деревьев конского каштана обыкновенного в Минске**

Вид работ	Единица измерения	Ориентировочные расценки работ за единицу, руб.	Общая стоимость работ, руб.
Подготовка стандартных посадочных мест для деревьев и кустарников механизированным способом с круглым комом земли	10 ям	От 31,33	От 939 900,00 до 4 228 200,00
Подготовка стандартных посадочных мест для деревьев и кустарников вручную с круглым комом земли	10 ям	От 80,06	От 2 401 800,00
Подготовка стандартных посадочных мест для деревьев и кустарников механизированным способом с квадратным комом земли	10 ям	От 146,04 до 374,09	От 4 381 200,00 до 11 222 700,00
Подготовка стандартных посадочных мест для деревьев и кустарников вручную с квадратным комом земли	10 ям	От 226,01 до 714,63	От 6 780 300,00 до 21 438 900,00
Подготовка нестандартных посадочных мест для деревьев и кустарников с комом земли механизированным способом в естественном грунте	10 м ³ ям	От 72,72	От 2 181 600,00
Подготовка нестандартных посадочных мест для деревьев и кустарников с комом земли вручную в естественном грунте	10 м ³ ям	От 173,47	От 5 204 100,00
Посадка деревьев и кустарников с комом земли	10 деревьев	От 94,78 до 1078,60	От 2 843 400,00 до 32 358 000,00
Подготовка стандартных посадочных мест для деревьев-саженцев механизированным способом с оголенной корневой системой в естественном грунте	10 ям	От 33,44	От 1 003 200,00
Подготовка стандартных посадочных мест для деревьев-саженцев вручную с оголенной корневой системой в естественном грунте	10 ям	От 55,74	От 1 672 200,00
Подготовка нестандартных посадочных мест для деревьев-саженцев механизированным способом в естественном грунте	10 м ³ ям	От 120,44	От 3 613 200,00
Подготовка нестандартных посадочных мест для деревьев-саженцев вручную в естественном грунте	10 м ³ ям	От 203,74	От 6 112 200,00
Посадка деревьев-саженцев с оголенной корневой системой в ямы	10 деревьев	От 111,84 до 132,84	От 3 355 200,00 до 3 985 200,00
Итого			От 4 295 100,00 до 36 343 200,00

Таблица 3

Ценовые диапазоны и общая стоимость саженцев устойчивых к повреждению инвазивными минерами древесных пород, рекомендованных для использования в зеленом строительстве Республики Беларусь [23, 24, 30] (по результатам анализа прейскурантов, размещенных на сайтах белорусских продавцов [31–37])

Название дерева	Закупочная цена 1 саженца, руб.	Общая стоимость саженцев, руб.
Конский каштан мясо-красный (<i>Aesculus × carnea</i> Zeyh)	45,00–432,00	От 13 500 000,00 до 129 600 000,00
Конский каштан красный (<i>Aesculus pavia</i> L.)	30,00–156,00	От 9 000 000,00 до 46 800 000,00
Клен (<i>Acer</i> spp.)	5,00–1680,00	От 1 500 000,00 до 504 000 000,00
Ясень обыкновенный (<i>Fraxinus excelsior</i> L.)	6,50–720,00	От 1 950 000,00 до 216 000 000,00

В итоге суммарные расходы на изъятие деревьев и проведение компенсационных посадок произрастающих в зеленых насаждениях конских каштанов могут составить от 24 357 684,00 руб. до 1 075 579 304,60 руб.

Следующей статьей затрат является приобретение посадочного материала. Ассортимент древесных растений, рекомендуемых к использованию в зеленом строительстве в Республике Беларусь, достаточно обширен и насчитывает более 17 позиций [23, 24, 30], однако пригодных для полноценного замещения конского каштана обыкновенного не так и много. Среди прочих следует выделить клен, липу, ясень, а также рассмотреть другие виды и формы конских каштанов. Стоимость посадочного материала (древесных саженцев) варьирует (использованы прейскуранты, размещенные в сетевом доступе [31–38]) в широких пределах в зависимости от вида, формовой принадлежности, возраста (размера), варианта с открытой/закрытой корневой системой, например, для кленов – от 5,00 до 1680,00 руб., ясеня – от 6,50 до 720,00 руб. В настоящее время в продаже в Минске имеются саженцы красноцветущих конских каштанов по цене от 30,00 до 156,00 руб. за экземпляр [31–37]. Расчеты стоимости приобретения нужного количества саженцев древесных пород, устойчивых к повреждению инвазивными минирующими вредителями (красноцветущие виды и формы конских каштанов, клены, ясень), представлены в табл. 3.

Соответственно, замещение 300 000 деревьев конского каштана обыкновенного другими древесными породами может обойтись в сумму от 1,5 до 504,0 млн руб.

Таким образом, суммарно замена экземпляров конского каштана обыкновенного, присутствующих в настоящее время в декоративных зеленых насаждениях, находящихся в ведении КУП «Минскзеленстрой» и коммунальных служб, оценивается в сумму от 25,8 до 1579,5 млн руб.

Заключение. Конский каштан обыкновенный (*A. hippocastanum*) в декоративных зеленых насаждениях населенных пунктов республики сильно повреждается чужеродным для фауны Беларуси, внесенным в оба издания «Черной книги инвазивных видов животных Беларуси» [2, 3] фитофагом – каштановой минирующей молью (*C. ohridella*). Заселенные минирующими личинками листовые пластинки меняют окраску, некротизируются, интенсивно колонизированные листья досрочно опадают.

В отсутствие мероприятий по контролю популяции вредителя посадки конского каштана утрачивают декоративность уже во второй половине лета, экономически и экологически приемлемые способы контроля популяций *C. ohridella* отсутствуют. В результате конский каштан обыкновенный более не используется при закладке новых зеленых насаждений и ставится вопрос о его замене в существующих. В статье представлены расчеты ориентировочных затрат для Минска на изъятие 300 тыс. деревьев конского каштана обыкновенного из насаждений (от 20,0 до 1039,2 млн руб.), приобретение (от 1,5 до 504,0 млн руб.) и посадку (от 4,3 до 36,3 млн руб.) саженцев устойчивых к повреждению инвазивными минерами древесных пород, оцениваемых на сумму от 25,8 до 1579,5 млн руб., – и это без учета стоимости работ по проектированию вышеуказанных мероприятий. Следует отметить, что действующими нормативными документами [38] предусмотрено взамен одного удаленного медленнорастущего листового дерева (к числу которых относится конский каштан обыкновенный) высадить от 1,5 до 3 медленнорастущих деревьев (в зависимости от качественного состояния удаляемого дерева), поэтому расчетные затраты окажутся не менее чем в полтора раза большими. Очевидно, такого масштаба финансовые затраты не осуществимы в ограниченный период времени в ближайшем будущем, следовательно, актуален поиск иных возможностей ограничения популяцио-

ной плотности, а значит, и вредоносности инвайдера в декоративных зеленых насаждениях.

Перспективным представляется проведение дальнейших исследований с целью поиска эко-

номически рациональных и экологически приемлемых методов контроля популяций данного инвазивного вредителя зеленых насаждений Беларуси.

Список литературы

1. Семенченко В. П. Чужеродные виды животных в естественных экосистемах Беларуси // Наука и инновации. 2018. № 7 (185). С. 20–25.
2. Черная книга инвазивных видов животных Беларуси / А. В. Алехнович [и др.]. Минск: Беларуская навука, 2016. 105 с.
3. Черная книга инвазивных видов животных Беларуси / В. П. Семенченко [и др.]. Минск: Беларуская навука, 2020. 163 с.
4. Фауна Беларуси. URL: <http://www.fauarb.info/> (дата обращения: 04.08.2020).
5. Рогинский А. С., Буга С. В. Трофические связи охридского минера и возможные риски повреждения древесных растений в зеленых насаждениях Беларуси // Структура и динамика биологического разнообразия: материалы I респуб. заочной науч.-практ. конф. молодых ученых, Минск, 23 дек. 2019 г. Минск, 2019. С. 214–217.
6. Каштановая минирующая моль на Украине / М. Д. Зерова [и др.]. Киев: Велес, 2007. 87 с.
7. Біологія каштанів / І. П. Григорюк [и др.]. Київ: Логос, 2004. 380 с.
8. Tracking origins of invasive herbivores through herbaria and archival DNA: the case of the horse-chestnut leaf miner / D. C. Lees [et al.] // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2011. Vol. 9. P. 322–328. DOI: 10.1890/100098.
9. Puchberger K. M. *Cameraria ohridella* Deschka et Dimič (Lep., Lithocolletidae) in Ober Österreich // *Steyrer Entomol. Runde*. 1990. Bd. 24. S. 79–81. DOI: 10.17221/4868-PPS.
10. Распространение и вредоносность каштановой минирующей моли (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič) в зеленых насаждениях Беларуси / А. С. Рогинский [и др.] // Труды БГУ. 2014. Т. 9, ч. 2. С. 95–103.
11. Каштановая минирующая моль (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) в Беларуси: экспансия завершена / А. С. Рогинский [и др.] // Зоологические чтения – 2015: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти профессора Бенедикта Дыбовского, Гродно, 22–24 апр. 2015 г. Гродно, 2015. С. 215–217.
12. Roginsky A. S. Mineuse du marronnier (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimic, 1986) organisme nuisible aux coulées vertes au Bélarus // Иностранные языки и современный мир: сб. материалов. Междунар. науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Брест, 15 апр. 2016 г. Брест, 2016. Ч. 2. С. 115–117.
13. Моштыль С. О., Рогинский А. С., Буга С. В. Динамика относительной площади поврежденной личинками каштановой минирующей моли (*Cameraria ohridella*) поверхности листочков сложных листьев конского каштана обыкновенного в зеленых насаждениях г. Минска // Зоологические чтения – 2019: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф., Гродно, 22–22 марта 2019 г. Гродно, 2019. С. 201–203.
14. Рогинский А. С., Моштыль С. О., Буга С. В. Проблема индуцированного патогенами и вредителями повторного цветения как угрозы устойчивости насаждений каштана конского обыкновенного в Беларуси // Молодежный форум по экологической безопасности: междуниверситет. студ. науч.-практ. конф., Брест, 23 марта 2018 г. Брест, 2018. С. 123–125.
15. Jaume L. S. Enhancing biological control in apple orchards // ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/267435599_Enhancing_biological_control_in_apple_orchards (date of access: 25.02.2023).
16. Post release evaluation of *Rodolia cardinalis* (Coleoptera: Coccinellidae) for control of *Icerya purchasi* (Hemiptera: Monophlebidae) in the Galapagos Islands / M. S. Hoddle [et al.] // *Biological control*. 2013. Vol. 67, issue 2. P. 262–274. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2013.08.010.
17. Temporal and spatial variations in the parasitoid complex of the horse chestnut leafminer during its invasion of Europe / G. Grabenweger [et al.] // *Biol. Invasions*. 2010. Vol. 12. P. 2797–2813. DOI: 10.1007/s10530-009-9685-z.
18. Ермолаев И. В., Ефремова З. А., Домрачев Т. Б. О влиянии паразитоидов (Hymenoptera, Eulophidae) на выживаемость липовой моли-пестрянки (*Phyllonorycter issikii*, Lepidoptera, Gracillariidae) в Удмуртии // Зоологический журнал. 2018. Т. 97, № 4. С. 401–407. DOI: 10.7868/S0044513418040037.
19. Standortabhängiges Parasitierungsverhalten von Gegenspielern der Roßkastanienminiermotte (*Cameraria ohridella*) in Berlin / B. Jäckel [et al.] // *Mitt. dtsh. ges. allg. angew. ent.* 2006. Vol. 15. P. 322–328.

20. Lupi D. A 3 year survey of the natural enemies of the horse-chestnut leaf miner *Cameraria ohridella* in Lombardy, Italy // *BioControl*. 2005. Vol. 50. P. 113–126. DOI: 10.1007/s10526-004-0298-2.
21. Рогинский А. С., Анацко Ю. В., Буга С. В. Оценка относительной площади повреждений личинками каштановой минирующей моли листовых пластинок конских каштанов в отдельных населенных пунктах Беларуси // Структура и динамика биологического разнообразия: материалы I Респ. заоч. науч.-практ. конф. молодых ученых, Минск, 23 дек. 2019 г. Минск, 2019. С. 217–220.
22. The horse-chestnut leaf miner in Europe – prospects and constraints for biological control / M. Kenis [et al.] // *Proceedings of the Second International Symposium on Biological Control of Arthropods, Davos, Switzerland, 12–16 September, 2005. Davos, 2005. P. 77–90.*
23. Кравчук Л. А., Рыжиков В. А. Структура, состояние и устойчивость древесных насаждений в посадках вдоль улиц и дорог в городах Беларуси // *Природопользование*. 2011. Вып. 20. С. 81–89.
24. Телеш А. Д., Григорьевич Л. Н. Микозы доминирующих древесных пород в городских зеленых насаждениях и мероприятия по снижению их развития // *Труды БГТУ*. 2014. № 1: Лесное хоз-во. С. 243–247.
25. Ванин С. И. Древесиноведение. М.; Л.: Гослесбумпром, 1949. 472 с.
26. Расчет кубов (м³) дерева // Центр проектирования. URL: <https://www.center-pps.ru/math/stroycalc/kubderevo.htm> (дата обращения: 03.08.2020).
27. Сборник Е68 // БелЕНИР. URL: <https://belenir.com/enir/sbor/E68> (дата обращения: 19.02.2020).
28. Сборник Е1 // БелЕНИР. URL: <https://belenir.com/enir/sbor/E1> (дата обращения: 19.02.2020).
29. Бесплатная сметная программа. Смета Татарникова // Белстройка. URL: <http://belstroyka.by/smetsaonline.html> (дата обращения: 16.02.2023).
30. Сидорович Е. А. Ассортимент декоративных деревьев и кустарников для зеленого строительства Беларуси. Минск: Тэхналогія, 1997. 62 с.
31. Каталог // Беккер 24/7. URL: <https://abekker.by/catalog> (дата обращения: 16.02.2023).
32. Продажа садовых растений в Минске // Саженец. бел. URL: <http://саженец.бел/каталог/> (дата обращения: 16.02.2023).
33. Каталог // Питомник «ВЫРАСТИМ ВМЕСТЕ». URL: <https://rastimvmeste.by/catalog> (дата обращения: 16.02.2023).
34. Саженцы // ФЕРМЕР-ПРО – все для капельного полива, саженцы деревьев и кустарников. URL: <https://fermerpro.by/sazhency/> (дата обращения: 16.02.2023).
35. Посадочный материал // Минский лесхоз. URL: <http://forestry.by/posadochnyj-material.html> (дата обращения: 16.02.2023).
36. Каталог // Plantator.by. URL: https://plantator.by/product_list (дата обращения: 16.02.2023).
37. Каталог // Плантсад. URL: <http://plantasad.by/katalog> (дата обращения: 16.02.2023).
38. Положение о порядке выдачи разрешений на удаление объектов растительного мира в населенных пунктах и разрешений на пересадку объектов растительного мира в населенных пунктах // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21300354> (дата обращения 14.04.2023).

References

1. Semenchenko V. P. Alien animal species in natural ecosystems of Belarus. *Nauka i innovatsii* [Science and innovations], 2018, no. 7 (185), pp. 20–25 (In Russian).
2. Alekhnovich A. V., Buga S. V., Drobenkov S. M., Zhorov D. G., Makarenko A. I., Petrov D. L., Rizevskiy V. K., Roginskiy A. S., Rybkina T. N., Sautkin F. V., Semenchenko V. P., Sinchuk O. V., Yanuta G. G. *Chernaya, kniga invazivnykh vidov zivotnykh Belarusi* [Black Book of Invasive Animal Species of Belarus]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2016. 105 p. (In Russian).
3. Semenchenko V. P., Buga S. V., Alekhnovich A. V., Baryshnikova S. V., Boyko S. V., Borodin O. I., Buben'ko A. N., Burko L. D., Bykovskaya A. V., Bychkova E. I., Volosach M. V., Volchkevich I. G., Golovchenko L. A., Golunov I. A., Dishuk N. G., Drobenkov S. M., Zhorov D. G., Kozul'ko N. G., Konopatskaya M. V., Kruglova O. Yu., Kulak A. V., Lipinskaya T. P., Makarenko A. I., Petrov D. L., Prishchepchik O. V., Rizevskiy V. K., Roginskaya Yu. S., Roginskiy A. S., Rybkina T. N., Saluk S. V., Sautkin F. V., Semenyak A. A., Sinchuk N. V., Sinchuk O. V., Timofeeva V. A., Trepashko L. I., Chernik M. I., Yakovich M. M., Yanuta G. G. *Chernaya, kniga invazivnykh vidov zivotnykh Belarusi* [Black Book of Invasive Animal Species of Belarus]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2020. 163 p. (In Russian).
4. Fauna of Belarus. Available at: <http://www.fauar.info/> (accessed 04.08.2020) (In Russian).
5. Roginsky A. S., Buga S. V. Trophic connections of the Ohrid miner and possible risks of damage to woody plants in green spaces of Belarus. *Struktura i dinamika biologicheskogo raznoobraziya: materialy I respublikanskoj zaochnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchennykh* [Structure and dyna-

mics of biological diversity: materials of the I Republican in absentia scientific-practical conference young scientists]. Minsk, 2019, pp. 214–217 (In Russian).

6. Zerova M. D., Nikitenko G. N., Narol'skiy N. B., Gershenzon Z. S., Sviridov S. V., Lukash O. V., Babidorich M. M. *Kashtanovaya miniruyushchaya mol' v Ukraine* [Horse-chestnut Leaf miner, *Cameraria ohridella*, in Ukraine]. Kyiv, Veles Publ., 2007. 87 p. (In Russian).

7. Grigoryuk I. P., Mashkovska S. P., Yavorovsky P. P., Kolesnichenko O. V. *Biologiya kashtaniv* [Biology of chestnuts]. Kyiv, Logos Publ., 2004. 380 p. (In Ukrainian).

8. Lees D. C., Lack H., Rougerie R., Hernandez-Lopez A., Raus T., Avtzi N., Augustin S., Lopez V. Tracking origins of invasive herbivores through herbaria and archival DNA: the case of the horse-chestnut leaf miner. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, vol. 9, pp. 322–328. DOI: 10.1890/100098.

9. Puchberger K. M. *Cameraria ohridella* Deschka et Dimič (Lep., Lithocolletidae) in Ober Österreich. *Steyrer Entomol. Runde*, 1990, vol. 24, pp. 79–81. DOI: 10.17221/4868-PPS (In German).

10. Roginsky A. S., Sinchuk A. V., Sautkin F. V., Buga S. V. Geographic distribution and harmfulness of the horse-chestnut leaf miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič) in green stands of Belarus. *Trudy BGU* [Proceedings of the Belarusian State University], 2014, vol. 9, no. 2, pp. 95–103 (In Russian).

11. Roginsky A. S., Sinchuk O. V., Sautkin F. V., Buga S. V. Horse-chestnut leaf miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) in Belarus: expansion completed. *Zoologicheskiye chteniya – 2015: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati professora Benedikta Dybovskogo* [Zoological Readings – 2015: materials of the International scientific and practical conference dedicated to the memory of Professor Benedict Dybovsky]. Grodno, 2015, pp. 215–217 (In Russian).

12. Roginsky A. S. Mineuse du marronnier (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimic, 1986) organisme nuisible aux coulées vertes au Bélarus. *Inostrannyye yazyki i sovremennyy mir: sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov* [Foreign languages and the modern world: collection of materials of the International scientific conference of students, undergraduates, graduate student]. Brest, 2016, part 2, pp. 115–117 (In French).

13. Mostyl S. O., Roginsky A. S., Buga S. V. Dynamics of relative area damaged by larvae of the chestnut miner moth (*Cameraria ohridella*) on the surface of leaflets of compound leaves of horse chestnut in green plantings of Minsk. *Zoologicheskiye chteniya – 2019: sbornik statey mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Zoological readings – 2019: collection of articles of the international scientific-practical conference]. Grodno, 2019, pp. 201–203 (In Russian).

14. Roginsky A. S., Moshtyl S. O., Buga S. V. The problem of repeated flowering induced by pathogens and pests as a threat to the stability of horse chestnut plantations in Belarus. *Molodezhnyy forum po ekologicheskoy bezopasnosti: mezhdunarodnaya studencheskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [Youth Forum on Environmental Safety: Interuniversity student scientific and practical conference]. Brest, 2018, pp. 123–125 (In Russian).

15. Jaume L. S. Enhancing biological control in apple orchards. Available at: https://www.researchgate.net/publication/267435599_Enhancing_biological_control_in_apple_orchards (accessed 25.02.2023).

16. Hoddle M. S., Crespo Ramirez C., Stosic Chr., Loayza J., Lincango P., Van Driesche R., Causton Ch. Post release evaluation of *Rodolia cardinalis* (Coleoptera: Coccinellidae) for control of *Icerya purchasi* (Hemiptera: Monophlebidae) in the Galapagos Islands. *Biological control*, 2013, vol. 67, issue 2, pp. 262–274. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2013.08.010.

17. Grabenweger G., Kehrl P., Zwiemüller I., Augustin S., Avtzi N., Bacher S., Freise J., Girardoz S., Guichard S., Heitland W., Lethmayer C., Stolz M., Tomov R., Volter L., Kenis M. Temporal and spatial variations in the parasitoid complex of the horse chestnut leafminer during its invasion of Europe. *Biol. Invasions*, 2010, vol. 12, pp. 2797–2813. DOI: 10.1007/s10530-009-9685-z.

18. Ermolaev I. V., Efremova Z. A., Domrachev T. B. Influence of parasitoids (Hymenoptera, Eulophidae) on the survival of the lined moth (*Phyllonorycter issikii*, Lepidoptera, Gracillariidae) in Udmurtia. *Zoological journal*, 2018, vol. 97, no. 4, pp. 401–407. DOI: 10.7868/S0044513418040037 (In Russian).

19. Jäckel B., Balder H., Grabenweger G., Hopp H., Koch T., Schmolling S. Standortabhängiges Parasitierungsverhalten von Gegenspielern der Roßkastanienminiermotte (*Cameraria ohridella*) in Berlin. *Mitt. dtsh. ges. allg. angew. ent.*, 2006, vol. 15, pp. 322–328 (In German).

20. Lupi D. A 3 year survey of the natural enemies of the horse-chestnut leaf miner *Cameraria ohridella* in Lombardy, Italy. *BioControl*, 2005, vol. 50, pp. 113–126. DOI: 10.1007/s10526-004-0298-2.

21. Roginsky A. S., Anatsko Yu. V., Buga S. V. Evaluation of the relative area of damage by larvae of the chestnut mining moth to leaf blades of horse chestnuts in certain settlements of Belarus. *Struktura i dinamika biologicheskogo raznoobraziya: materialy I respublikanskoy zaochnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchennykh* [Structure and dynamics of biological diversity: materials of the I Republican in absentia scientific-practical conference young scientists]. Minsk, 2019, pp. 217–220 (In Russian).

22. Kenis M., Tomov R. I., Svatoš A., Schlinsog P., Vaamonde C. L., Heitland W., Grabenweger G., Girardoz S., Freise J., Avtzis N. The horse-chestnut leaf miner in Europe – prospects and constraints for biological control. *Proceedings of the Second International Symposium on Biological Control of Arthropods*. Davos, 2005, pp. 77–90.

23. Kravchuk L. A., Ryzhikov V. A. Structure, condition and sustainability of tree plantations in plantations along the streets and roads in the cities of Belarus. *Prirodopol'zovaniye* [Nature management], 2011, issue 20, pp. 81–89 (In Russian).

24. Telesh A. D., Grigortsevich L. N. Mycoses of dominant tree species in urban green spaces and measures to reduce their development. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 1: Forestry, pp. 243–247 (In Russian).

25. Vanin S. I. *Drevesinovedeniye* [Wood science]. Moscow; Leningrad, Goslesbumprom Publ., 1949. 472 p. (In Russian).

26. Calculation of 3 cubes (m³). Available at: <https://www.center-pss.ru/math/stroycalc/kubderevo.htm> (accessed 08.03.2020) (In Russian).

27. Collection E68. Available at: <https://belenir.com/enir/sbor/E68> (accessed 19.02.2020) (In Russian).

28. Collection E1. Available at: <https://belenir.com/enir/sbor/E1> (accessed 19.02.2020) (In Russian).

29. Free estimate program. Tatarnikov's estimate. Available at: <http://belstroyka.by/smetaonline.html> (accessed 16.02.2023) (In Russian).

30. Sidorovich E. A. *Assortiment dekorativnykh derev'yev i kustarnikov dlya zelenogo stroitel'stva Belarusi* [Assortment of ornamental trees and shrubs for green building in Belarus]. Minsk, Technologiya Publ., 1997. 62 p. (In Russian).

31. Catalog. Available at: <https://abekker.by/catalog> (accessed 16.02.2023) (In Russian).

32. Sale of garden plants in Minsk. Available at: <http://саженец.бел/каталог> (accessed 16.02.2023) (In Russian).

33. Catalog. Available at: <https://rastimvmeste.by/catalog> (accessed 16.02.2023) (In Russian).

34. FERMER-PRO - everything for drip irrigation, seedlings of trees and shrubs. Available at: <https://fermerpro.by/sazhency/> (accessed 16.02.2023) (In Russian).

35. Planting material. Available at: <http://forestry.by/posadochniy-material.html> (accessed 16.02.2023) (In Russian).

36. Catalog. Available at: https://plantator.by/product_list (accessed 16.02.2023) (In Russian).

37. Catalog. Available at: <http://plantasad.by/katalog> (accessed 16.02.2023) (In Russian).

38. Regulations on the procedure for issuing permits for the removal of flora objects in settlements and permits for the transplantation of flora objects in settlements. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21300354> (accessed 14.04.2023) (In Russian).

Информация об авторах

Рогинский Алексей Сергеевич – кандидат биологических наук, доцент кафедры зоологии. Белорусский государственный университет (220030, г. Минск, пр. Независимости, 4, Республика Беларусь). E-mail: bio.roginski@mail.ru

Анацко Юлия Валентиновна – ассистент кафедры зоологии. Белорусский государственный университет (220030, г. Минск, пр. Независимости, 4, Республика Беларусь). E-mail: AnatskaYU@bsu.by

Буга Сергей Владимирович – доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой зоологии. Белорусский государственный университет (220030, г. Минск, пр. Независимости, 4, Республика Беларусь). E-mail: sergey.buga@gmail.com

Information about the authors

Roginsky Alexey – PhD (Biology), Assistant Professor, the Department of Zoology. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bio.roginski@mail.ru

Anatsko Yulia – Assistant Lecturer, the Department of Zoology. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: AnatskaYU@bsu.by

Buga Sergey – DSc (Biology), Professor, Head of the Department of Zoology. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sergey.buga@gmail.com

Поступила 15.03.2023

УДК 630*244

А. А. Сазонов, Д. А. Бабуль, П. В. Пацукевич
РУП «Белгослес»

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДУБРАВ ВЫБОРОЧНЫМИ САНИТАРНЫМИ РУБКАМИ: ПРОБЛЕМЫ И СПОСОБЫ ИХ ПРЕОДОЛЕНИЯ

На основании результатов опытных работ обсуждаются пути совершенствования санитарно-оздоровительных мероприятий в дубравах Беларуси на этапе их восстановления после депрессии 2003–2008 гг. Показано, что деревья, пораженные хроническими болезнями и повреждениями, накапливаются уже в средневозрастных дубовых древостоях, что вызывает со временем снижение устойчивости насаждений. Для оздоровления дубрав предлагается шире использовать выборочные санитарные рубки. Впервые для Беларуси описаны результаты экспериментальных рубок, где применялась специальная шкала по отбору в рубку деревьев дуба при проведении выборочных санитарных рубок. Сформулированы выводы и рекомендации производству, позволяющие усовершенствовать нормативно-технические документы по проведению санитарных рубок в дубравах. Предлагаются направления для дальнейших исследований проблемы повышения эффективности рубок как инструмента оздоровления дубрав.

Ключевые слова: санитарные рубки, дубравы, категории состояния деревьев, лесозащитные мероприятия.

Для цитирования: Сазонов А. А., Бабуль Д. А., Пацукевич П. В. Повышение устойчивости дубрав выборочными санитарными рубками: проблемы и способы их преодоления // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 87–99. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-11.

A. A. Sazonov, D. A. Babul', P. V. Patsukevich
Republican Unitary Enterprise "Belgosles"

INCREASING THE RESISTANCE OF THE OAK FORESTS BY SELECTIVE SANITARY LOGGING: PROBLEMS AND WAYS TO OVERCOME THEM

Based on the results of experimental work, the ways of improving sanitary and health measures in the oak forests of Belarus at the stage of their recovery after the depression of 2003–2008 are discussed. It is shown that trees affected by chronic diseases and damage accumulate already in middle-aged oak stands, which causes a decrease in the resistance of plantings over time. For the rehabilitation of oak forests, it is proposed to use selective sanitary logging more widely. For the first time in Belarus, the results of experimental logging are described, where a special scale was used to select oak trees for felling during selective sanitary logging. Conclusions and recommendations to the production allowing to improve the regulatory-technical documents for sanitary felling in oak forests are formulated. The directions for further research of the problem of increasing the efficiency of logging as a tool for rehabilitation of oak forests are proposed.

Keywords: sanitary felling, oak forests, tree condition categories, forest protection measures.

For citation: Sazonov A. A., Babul' D. A., Patsukevich P. V. Increasing the resistance of the oak forests by selective sanitary logging: problems and ways to overcome them. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 87–99. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-11 (In Russian).

Введение. По современным представлениям [1], для формации дубовых лесов Беларуси характерны последовательно сменяющие друг друга стадии лесопатологического состояния, которые выявляются методами лесопатологического мониторинга:

– *предкризисная, или стадия ослабления*, – характеризуется накоплением ослабленных деревьев и насаждений;

– *стадия кризиса, или депрессии*, – характеризуется массовым усыханием и гибелью ослабленных деревьев и насаждений;

– *посткризисная, или стадия восстановления*, – характеризуется постепенным улучшением состояния дубрав за счет гибели ослабленных и поврежденных деревьев, а также оздоровлением выживших жизнеспособных растений.

В русскоязычной лесоводственной литературе массовое усыхание твердолиственных лесов по различным причинам часто называется термином «депрессия», который был предложен нашим соотечественником К. Б. Лосяцким в 1975 г. [2]. В литературных источниках зафиксированы три периода массового усыхания дубрав на территории Беларуси, которые пришлись на 1940–1945 [3], середину 1970-х – начало 1980-х [4] и 2003–2008 гг. [5]. Из имеющихся данных можно сделать вывод, что депрессия дубрав в условиях Беларуси обычно продолжается около 6–8 лет. Затем следует восстановительный период, постепенно сменяемый периодом ослабления, в конце которого происходит накопление в древостоях повышенного количества деревьев, пораженных хроническими болезнями. Общая продолжительность этапов восстановления – ослабления составляет от 22 до 30 лет, за которыми следует новая депрессия. Это означает, что каждый дубовый древостой, дожив до возраста 45–50 лет, попадает в «зону риска» и может пострадать в случае наступления периода депрессии. А прежде чем достигнуть возраста спелости (120–140 лет), каждая дубрава должна пережить депрессию не менее 3–4 раз.

Древостои, которые способны противостоять негативному влиянию патологических факторов различной природы, должны иметь в своем составе как можно меньше ослабленных деревьев дуба, которые могут послужить кормовой базой для вредителей и болезней, а также являются кандидатами на отмирание в период депрессии дубрав. Поэтому на этапе восстановления, который продолжается в белорусских дубравах с 2009 г. по настоящее время, нельзя отказываться от лесозащитных мероприятий. Необходимо проводить работу по повышению биологической устойчивости дубовых древостоев, в том числе путем регулирования в них количества деревьев с признаками патологии. Важнейшую роль в этом должны играть выборочные санитарные рубки.

К сожалению, на практике санитарно-оздоровительные мероприятия в дубравах применяются ограниченно. Так, по официальным данным [6], сплошные санитарные рубки в 2021 г. в дубравах республики не проводились, а выборочными санитарными рубками пройдено всего 757,6 га (0,27% площади дубрав) с выбираемым объемом 7,56 тыс. м³, при площади покрытых лесом земель, занятых дубом в республике, – 277 396 га [7]. В отдельных регионах Беларуси от проведения выборочных санитарных рубок в дубравах фактически отказались. Например, в лесхозах Гомельской области, где сосредоточено примерно 48% дубрав республики, выборочные санитарные рубки в 2021 г. про-

ведены на площади всего 1,1 га [6]. При этом, по данным проведенных в 2021–2022 гг. экспедиционных лесопатологических обследований, доля дубрав с нарушенной устойчивостью, значительная часть которых нуждается в проведении санитарно-оздоровительных мероприятий, в отдельных лесхозах Гомельской области составляет: 35,6% – в Мозырском опытном, 32,5% – в Гомельском опытном, 49,7% – в Речицком опытном. Подобная ситуация объясняется не только нежеланием лесоводов заниматься проблемой оздоровления дубрав. Существует ряд объективных причин, которые не позволяют проводить в дубравах санитарно-оздоровительные мероприятия, в особенности выборочные санитарные рубки, в необходимых объемах.

Первой из таких причин является положение санитарных правил [8], требующее проведения выборочной санитарной рубки только в тех насаждениях, где текущий отпад превышает установленную норму для биологически устойчивых древостоев, т. е. в насаждениях, фактически находящихся в процессе усыхания. Данное положение успешно применяется в период депрессии дубрав, когда количество текущего отпада в древостоях превышает норму. Но на этапе восстановления, для которого характерно отсутствие острых патологических процессов в дубравах, размер текущего отпада редко бывает повышенным. В результате выборочные санитарные рубки не назначаются, что содействует накоплению деревьев, пораженных такими хроническими заболеваниями и повреждениями, как стволовые гнили, поперечный рак дуба, морозные трещины и др. Таким образом, логично предположить, что критерии назначения выборочных санитарных рубок в дубравах должны изменяться в соответствии со стадией их лесопатологического состояния: в период депрессии рубки назначаются в древостоях с текущим отпадом, превышающим норму, а в периоды восстановления и ослабления – в очагах болезней и вредителей с повышенным количеством больных и поврежденных деревьев. В последнем случае размер текущего отпада не должен быть определяющим критерием для назначения рубки.

Второй причиной является отсутствие в нормативных документах специальной шкалы по отбору в рубку деревьев дуба при проведении выборочных санитарных рубок. Из-за этого лесоводы вынуждены пользоваться при их проведении имеющейся в санитарных правилах [8] 7-ступенчатой шкалой категорий состояния деревьев дуба, которая достаточно сложна в применении, поскольку предназначена для целей лесопатологического мониторинга, т. е. фактически только для использования специалистами – лесопатологами, имею-

щими соответствующую подготовку в области защиты леса. Лесовод же при проведении санитарно-оздоровительных мероприятий должен разделять деревья всего на две категории: оставляемые и удаляемые. С учетом различных симптомов поражения и повреждения болезнями, вредителями и неблагоприятными абиотическими факторами количество категорий в шкале, предназначенной для отбора деревьев в рубку, может быть увеличено. Однако доведение их общего числа до 7 является неоправданным усложнением, приводящим в итоге к путанице и ошибкам, и как следствие – «боязни» лесоводов проводить санитарные рубки в дубравах, которые в них нуждаются.

Для устранения названных проблем в 2010 г. предложена упрощенная 4-ступенчатая шкала категорий состояния, предназначенная для отбора деревьев дуба в рубку при проведении различных видов выборочных рубок (табл. 1) [9, 10]. Эта классификация является не только лесопатологической, но и хозяйственно-биологической. Каждая категория имеет в ней двойное название, первое из которых указывает на состояние дерева, а второе – на его хозяйственную оценку, определяющую возможную судьбу дерева при проведении выборочной рубки. Данная классификация взаимосвязана со шкалой, применяемой при отборе деревьев на рубках ухода. Их соотношение показано там же (табл. 1).

Таблица 1

Шкала категорий состояния деревьев дуба, предназначенная для отбора их в рубку

Категория деревьев при ВСР	Признаки состояния деревьев	Категория деревьев при РУ
I. Внешне здоровые (сохраняемые)	Типичные признаки здоровых деревьев: крона густая, листва зеленая, прирост нормальный, сухие ветви внизу кроны	Лучшие (деревья ухода)
	Допускаются единичные водяные побеги, механические повреждения до 1 дм ² , поперечный рак до 1/3 периметра ствола, дефолиация листогрызущими насекомыми любой степени, поражение листвы мучнистой росой любой степени	Вспомогательные (полезные)
II. Ослабленные жизнеспособные (частично сохраняемые)	Возможна ажурная крона, усыхание отдельных ветвей (до 30%) в верхней и средней частях кроны, прирост может быть ослаблен	Нежелательные (подлежащие удалению)
	Повреждение ствола и (или) корневых лап (гнилевое, бактериальное, механическое, огневое и др.) до 30% окружности в месте повреждения (до 80 лет) или до 40% (81 год и более); сухобочины под корой и попытки заселения ксилофагов, локализованные деревом; раковые опухоли от поперечного рака закрытого типа (любое количество)	
III. Ослабленные нежизнеспособные (удаляемые)	Повреждение ствола и (или) корневых лап (гнилевое, бактериальное, механическое, огневое и др.) 31% и более окружности (до 80 лет) или 41% и более (81 год и старше); распространяющиеся сухобочины, успешные поселения златок или усачей на стволе; плодовые тела дереворазрушающих грибов, дупла, раковые опухоли открытого типа (или муфтообразные утолщения); морозные трещины (заросшие и незаросшие), грозобойные трещины; деревья с усыханием ветвей в верхней и средней частях кроны 31% и более, суховершинные, с обильными водяными побегами; листва может быть объедена или преждевременно желтеть и опадать; прирост может быть ослаблен или отсутствовать; сюда же следует относить деревья, усохшие в год обследования (свежий сухостой), а также «остолопы»	
IV. Погибшие (частично удаляемые)	Заболонь и луб разрушены или разрушаются, кора отслоилась от древесины или опала; листвы нет, часть ветвей может быть опавшей (старый сухостой); сюда же относятся ветровальные и буреломные деревья (за исключением «остолопов») независимо от давности их образования	

Основная часть. Предлагаемая шкала по отбору деревьев дуба в рубку допускает возможность проведения выборочных санитарных рубок (ВСР) по разным технологиям, используя при этом различные критерии отбора деревьев. На практике возможны следующие варианты (табл. 2):

1. ВСР по «интенсивной» технологии предполагает возможность удаления из древостоя всех деревьев с признаками патологии. Интенсивность рубки здесь будет самая высокая, а порядок отбора деревьев в рубку фактически такой же, как при проведении рубок ухода.

2. ВСР по «традиционной» технологии предполагает выборку ослабленных нежизнеспособных и погибших деревьев, и порядок отбора их в рубку здесь наиболее близок к привычному для лесоводов удалению деревьев III^б–VI категорий шкалы санитарных правил. Отличие заключается в том, что при использовании новой шкалы мы можем убирать из древостоя все «сильно ослабленные» деревья (категории III^а и III^б), т. е. интенсивность рубки будет несколько выше, чем при использовании обычной 7-ступенчатой шкалы из санитарных правил [8].

3. ВСР по «упрощенной» технологии предполагает удаление только ослабленных нежизнеспособных деревьев, что эквивалентно удалению III^а–V категорий деревьев из шкалы санитарных правил [8]. При этом старый сухостой не вырубается – эта категория безопасна для окружающих жизнеспособных растений дуба, поскольку на ней агрессивные патогены и вредители не развиваются. Интенсивность выборки при этом наименьшая из всех вышеперечисленных вариантов, но защитный эффект рубки сохраняется. Такая технология проведения ВСР может использоваться в условиях, когда проведение рубки убыточно с точки зрения соотношения затрат и стоимости получаемой продукции (труднодоступные, удаленные, мелкие участки дубрав), но мероприятия по оздоровлению древостоя необходимы. В этом случае нужно сокращать издержки за счет сни-

жения объема заготовленной древесины, чего и можно достичь, применяя «упрощенную» технологию рубки. Кроме того, она отличается повышенной экологичностью, поскольку предполагает сохранение старого сухостоя, который является местом обитания редких и полезных представителей флоры и фауны. Поэтому такая технология ВСР может также использоваться на репрезентативных участках лесного фонда и части ООПТ, где в процессе санитарных рубок нужно сохранить условия для обитания редких и ценных видов флоры и фауны.

4. Уборка захламленности – последний вариант выборочной рубки, при котором удаляются только старый сухостой и захламленность. При отсутствии свежей захламленности данный вид рубки не имеет защитного эффекта в дубравах. Уборку захламленности целесообразно проводить в эстетических целях в рекреационно-оздоровительных лесах, а также в лесах других категорий защитности при наличии спроса на заготавливаемую древесину.

Прежде чем рекомендовать применение на производстве представленной шкалы (табл. 1) и различных вариантов проведения ВСР с ее помощью (табл. 2), нами была проведена их проверка на опытных объектах. С этой целью на территории Гомельского опытного лесхоза заложен испытательный объект ГО-2-2010 в виде 4-секционной пробной площади, на которой были проведены экспериментальные рубки (рисунок). При этом секция 1 была оставлена в качестве контрольной (без рубки), а на секциях 2, 3, 4 были проведены ВСР по интенсивной, традиционной и упрощенной технологиям соответственно. Хронология работ на объекте следующая:

- 2010 г. – подбор участка и закладка 4-секционной пробной площади;
- 2012 г. – отбор деревьев и проведение рубки;
- 2014 г. – оценка предварительных результатов рубки;
- 2022 г. – оценка результатов через 10 лет после рубки.

Таблица 2

Схема различных технологий проведения выборочных санитарных рубок, которые могут применяться в дубовых насаждениях

Технология рубки	Выбираемая категория деревьев			
	I	II	III	IV
ВСР по интенсивной технологии		X	X	X
ВСР по традиционной технологии			X	X
ВСР по упрощенной технологии			X	
Уборка захламленности				X

Примечание. Удаляемые в процессе рубки категории деревьев выделены знаком X.

Описание участка. Опытный объект ГО-2-2010 расположен в кв. 6 выд. 8 Романовичского лесничества Гомельского опытного лесхоза (лесоустройство 2020 г.). Площадь объекта составляет 0,69 га. Почву можно охарактеризовать как дерново-подзолистую временно избыточно увлажняемую жесткими грунтовыми водами песчаную на связном водно-ледниковом песке, сменяемом песком рыхлым с прослойкой суглинка на глубине до 1 м. Дата закладки – 23–29 июля 2010 г. По таксационному описанию, насаждение представлено лесными культурами дуба в возрасте 50 лет, созданными на вырубке, тип леса – дубрава кисличная.

При продвижении от первой к четвертой секции характеристики насаждения несколько изменяются: происходит понижение рельефа, снижается продуктивность, увеличивается примесь березы в составе древостоя, возрастает доля сухостойных деревьев от общего запаса (табл. 3). Насаждение на опытном участке к 2010 г. вышло из состояния депрессии и находилось на этапе восстановления.

Об этом можно судить по накоплению большого количества старого сухостоя на фоне незначительного текущего отпада. Особенностью образования сухостоя здесь является его приуроченность к низшим ступеням толщины, распространение усыхания преимущественно среди тонкомера. Это прослеживается на всех секциях, о чем можно судить по большой разнице в значениях средневзвешенной категории состояния дуба в 2010 г., определенной по числу стволов и запасу. Фактически усиление отпада дуба в период депрессии привело к оздоровлению насаждения, поскольку погибли в первую очередь наиболее ослабленные угнетенные деревья.

Тем не менее, среди живых деревьев доля пораженных различными заболеваниями и повреждениями осталась существенной. Их уда-

ление из насаждения привело бы к его дальнейшему оздоровлению, позволило бы снизить инфекционный фон болезней, послужило бы профилактической мерой, предупреждающей усиление гибели деревьев в будущем.

Полнота древостоя на различных секциях колебалась от 0,60 до 0,72 и в целом соответствовала «средней». По действовавшим нормативно-техническим документам [11] здесь нельзя было проводить рубки ухода. Поэтому на фоне усыхания части деревьев, а также поражения их хроническими болезнями экспериментальные выборочные санитарные рубки были оптимальной мерой ухода за лесом. Динамика лесоводственных и лесопатологических показателей насаждения приведена в табл. 3.

Динамика лесоводственных показателей. К 2022 г., за прошедшие с момента закладки опытного объекта 12 лет, древостой достиг возраста 62 лет. Количество деревьев главной породы на всех секциях снизилось в 2 и более раза за счет их вырубки, а также естественного отпада. На всех секциях зафиксирован «скачок продуктивности» – увеличение бонитета на один класс. В результате на секциях 1–3 бонитет достиг Iа, на секции 4 – I класса.

На контрольной секции состав древостоя не изменился (10Д). Средняя высота увеличилась с 19,1 до 25,1 м, средний диаметр – с 25,1 до 32,1 см. Абсолютная полнота возросла от 17,7 до 24,9 м²/га, что эквивалентно изменению относительной полноты от 0,60 до 0,78. Запас 1-го яруса древостоя (жизнеспособных деревьев) увеличился за 12 лет на 119 м³/га, достигнув 292 м³/га.

На секции 2, где в 2012 г. проводилась ВСР по интенсивной технологии, были удалены почти все деревья с признаками патологии, а также мертвый лес. В результате было заготовлено 90 м³/га древесины, из которых 48 м³/га – живые деревья.

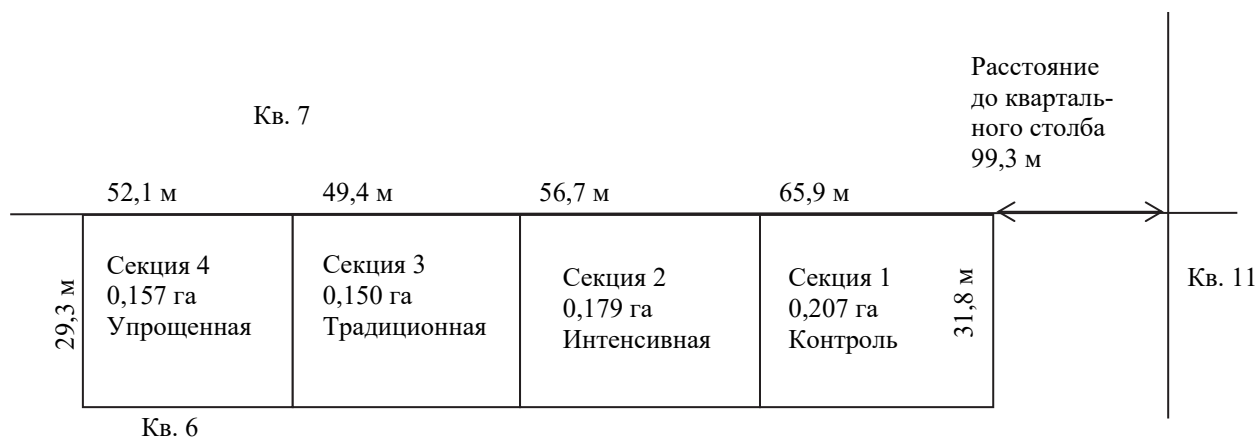


Рис. Схема и привязка опытного объекта ГО-2-2010 РУП «Белгослес»

Таблица 3

Динамика таксационной характеристики и лесонатологического состояния насаждения на опытном объекте ГО-2-2010

Параметры	Ед. изм.	Значения											
		Секция 1 (контрольная)			Секция 2 (интенсивная)			Секция 3 (традиционная)			Секция 4 (упрощенная)		
		2010	2014	2022	2010	2014	2022	2010	2014	2022	2010	2014	2022
Время перечета	год	2010	2014	2022	2010	2014	2022	2010	2014	2022	2010	2014	2022
Площадь ППП	га	0,207			0,179			0,150			0,157		
Количество деревьев дуба, всего	шт.	112	82	66	118	38	37	114	44	41	104	63	42
В т. ч. жизнеспособных	шт.	66	64	58	55	37	36	59	41	40	53	37	34
Таксационная характеристика 1-го яруса													
Состав	ед.	10Д + Я, Кл, Лп, Б	10Д + Я, Кл, Лп, Б	10Д + Я, Кл, Лп, Б	10Д + Я, Кл, Лп, Б	7Д1Я1Г1Б + Кл	7Д2Б1Г + Кл	10Д + Б	10Д + Б	10Д + Б, Кл	8Д2Б	7Д3Б	7Д3Б
Возраст	лет	50	54	62	50	54	62	50	54	62	50	54	62
Высота	м	19,1	22,3	25,1	19,3	22,6	24,9	18,7	21,2	27,3	16,5	18,2	22,2
Диаметр	см	25,1	27,6	32,1	24,8	27,4	31,8	24,2	26,8	30,5	21,7	24,2	28,7
Бонитет	–	1	1 ^a	1 ^a	1	1 ^a	1 ^a	1	1	1 ^a	2	1	1
Тип леса	–	Д. кис.	Д. кис.	Д. кис.	Д. кис.	Д. кис.	Д. кис.	Д. кис.	Д. кис.	Д. кис.	Д. кис.	Д. кис.	Д. кис.
Абсолютная полнота	м ² /га	17,7	20,6	24,9	21,3	18,7	23,0	18,6	15,8	20,8	16,3	15,4	20,5
Относительная полнота	–	0,60	0,70	0,78	0,72	0,62	0,72	0,63	0,54	0,66	0,62	0,55	0,68
Запас живых деревьев (I-IV)	м ³ /га	173	232	292	204	202	271	173	164	270	136	140	216
Количество деревьев	шт./ПП	78	73	64	88	59	56	64	46	46	96	76	70
Заготовлено древесины	жив.	0			48			45			27		
мерт.	мерт.	0			42			54			2		
Таксационная характеристика 2-го яруса													
Состав	ед.	4Г3Гр1В + 1Кл1Б + Д, Я, Лп	4Г2Кл2Гр1 + В1Лп + Я, Б	5Г2Кл2В + 1Лп + Я, Д	9Г1Б	10Г + Б	9Г1В + Кл, Б	3Кл5ЯБ + 2Г	4Кл4ЯБ + 2Г	5Г5Кл + Я, ЯБ	–	–	6Г3Б1Кл
Возраст	лет	30	30	30	30	40	40	30	40	20	–	–	40
Высота	м	10,2	13,2	11,6	10,5	13,7	13,5	11,1	13,8	7,7	–	–	12,0
Диаметр	см	12,7	13,6	10,4	8,5	12,6	11,6	16,0	19,9	6,7	–	–	8,3
Абсолютная полнота	м ² /га	1,0	1,3	1,8	0,6	0,9	2,2	0,4	0,6	1,0	–	–	0,7
Относительная полнота	–	0,05	0,06	0,07	0,03	0,04	0,09	0,02	0,03	0,05	–	–	0,03
Запас живых деревьев (I-IV)	м ³ /га	6	9	14	3	6	16	2	4	10	–	–	4
Количество деревьев	шт./лп	24	20	43	17	14	39	4	4	28	–	–	20
Время перечета	год	2010	2014	2022	2010	2014	2022	2010	2014	2022	2010	2014	2022

Окончание таблицы 3

Параметры	Ед. изм.	Значения											
		Секция 1 (контрольная)			Секция 2 (интенсивная)			Секция 3 (традиционная)			Секция 4 (упрощенная)		
Подпрост (условно средний)													
Состав	ед.	5Кл1Я3Г 1Лп	6Кл2В 2Г + Д	6Кл2Г 2Лп	7Кл2В 1Г + Я	6Кл2Г1В 1Я	7Кл3Г + + Д, Я	7Кл1Д1Я 1Г	6Кл2Г1Я 1Б	6Г4Кл	7Г2Б1Ос	4Г2Кл3Б 1Ос	6Г2Кл2Б
Количество деревьев	тыс. шт./га	2,1	1,8	5,9	2,3	3,7	6,4	1,0	1,9	2,5	2,0	1,5	2,1
Лесопатологическая характеристика													
СКС деревьев дуба:													
– по количеству стволов	–	3,32	2,33	1,62	3,84	1,26	1,49	3,62	1,75	1,39	3,68	3,11	2,02
– по запасу	–	2,41	1,48	1,32	2,47	1,18	1,33	2,43	1,55	1,39	2,63	1,91	1,33
Текущий опад	м ³ /га	0,8	5,5	2,8	1,6	0,5	3,0	0,9	1,2	0	1,6	2,3	0
Старый сухостой	м ³ /га	36,9	10,1	6,8	37,9	1,8	1,2	45,1	0,7	1,3	39,5	17,8	5,9
Болезни и повреждения:													
– стволовая гниль		1,5	1,6	8,6	16,4	2,7	5,6	18,7	4,9	12,5	7,5	2,7	2,4
– в т. ч. ложный дубо- вый трутовик		–	–	–	10,9	2,7	5,6	8,5	4,9	–	7,5	–	–
– усыхание ветвей		22,7	10,9	1,5	18,2	27,8	8,3	15,3	17,1	2,5	20,8	10,8	2,9
– поперечный рак		7,6	9,4	12,8	21,8	10,8	11,1	8,5	9,8	10,0	7,5	5,4	5,9
– морозные трещины		18,2	14,1	24,1	20,0	5,4	2,8	15,3	9,8	12,5	15,1	8,1	11,8
– механические по- вреждения		–	3,2	–	10,9	–	–	1,7	2,4	–	–	–	–
– опенок (на сухостое)	%	38,4	–	–	44,1	–	–	–	2,3	–	–	–	2,4
– опенок (на живых)		–	2,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
– заселено стволовы- ми вредителями		–	2,4	–	–	–	–	–	2,3	–	–	4,8	–
– отработано		38,4	20,7	13,6	50,0	2,6	2,7	59,7	6,8	2,0	56,7	31,8	14,3
– повреждено листо- грызущими		–	6,8	–	–	4,3	–	–	5,4	–	–	6,2	–
– сухобокость		1,5	–	6,8	1,8	–	2,8	5,1	–	–	1,9	–	–
– бактериальная во- дянка		–	–	–	–	–	–	–	–	2,5	–	–	–

Примечание. СКС – средневзвешенная категория состояния деревьев.

На секции 3, где была ВСР по традиционной технологии, удалялись только ослабленные нежизнеспособные деревья и мертвый лес, но объем выборки составил 99 м³/га, что неожиданно оказалось больше, чем на предыдущей. Это объясняется большим накоплением здесь мертвого леса (54 м³/га на секции 3 по сравнению с 42 м³/га на секции 2), который также изымается в процессе рубки. Объем изъятия жизнеспособных деревьев (45 м³/га) на секции 3 был меньше, чем на секции 2.

На секции 4 выборочные санитарные рубки проводились по упрощенной технологии, и изъятию подлежали в основном ослабленные нежизнеспособные деревья. Из состава мертвого леса изымался только текущий отпад, а весь старый сухостой был оставлен. В результате интенсивность рубки здесь была примерно в 3 раза ниже, чем на предыдущих секциях – заготовлено 29 м³/га древесины. Не следует забывать, что и продуктивность насаждения здесь также ниже на один класс бонитета. На всех опытных секциях проведенные ВСР вызвали снижение полноты: на секции 2 – на 0,10; на секции 3 – на 0,09; на секции 4 – на 0,07 по состоянию на 2014 г. После рубки полнота на опытных секциях оказалась 0,54–0,62, но в дальнейшем происходило ее быстрое повышение. Так, к 2022 г., через 10 лет после рубки, полнота древостоя на секции с интенсивной технологией рубки достигла первоначальной величины (0,72), а на других опытных секциях превысила их первоначальные значения, зафиксированные в 2010 г. При этом ни на одной из опытных секций в 2022 г. полнота не достигла уровня контрольной.

В процессе обследования 2014 г., через 2 года после рубки, было зафиксировано повышение запаса древостоя на секции 4 на 4 м³/га, а на остальных опытных секциях запас снизился на 2–9 м³/га. Но через 10 лет после рубки запас не просто восстановился, а значительно увеличился на всех опытных секциях (до 216–271 м³/га), хотя пока и не достиг уровня контрольной (292 м³/га).

Если оценивать экономическую продуктивность на каждой секции как сумму прироста древостоев за период 2010–2022 гг. и объема вырубленной в процессе экспериментальных рубок древесины, тогда получим следующие показатели:

- секция 1: 119 + 0 = 119 м³/га;
- секция 2: 67 + 90 = 157 м³/га;
- секция 3: 97 + 99 = 196 м³/га;
- секция 4: 80 + 29 = 109 м³/га.

Таким образом, на секциях 2 и 3 экономическая продуктивность оказалась выше, чем на

контрольной на 38 и 77 м³/га соответственно. На секции 4 этот показатель оказался ниже контроля, поскольку сухостойные деревья здесь не вырубались, а бонитет древостоя изначально был ниже.

Динамика второго яруса и подроста. Изреживание первого яруса дубового древостоя в результате усыхания и последовавшей позднее ВСР обеспечило увеличение притока света под полог леса. Это стимулировало начало формирования второго яруса древостоя и подроста. По данным проведенных учетов, под пологом леса образовался второй ярус из теневыносливых видов деревьев с преобладанием клена и граба, а также примесью вяза, липы, ясеня, а на секции 4 – и березы. Полнота этого яруса отмечалась как очень низкая (0,03–0,09), а запас составлял от 4 до 16 м³/га, но там, где интенсивность выборки деревьев была выше (секция 2), скорость его формирования оказалась наибольшей.

За период 2010–2022 гг. количество подроста под пологом леса на секциях 1–3 увеличилось в 2,5–3,0 раза, достигнув в результате 2,5–6,4 тыс. шт./га в пересчете на условно средний. И только на секции 4 его количество за время наблюдений практически не изменилось. В составе подроста преобладают те же теневыносливые виды, которые составляют второй ярус.

Изменения санитарного состояния. Средневзвешенная категория состояния дуба (СКС) по запасу на момент закладки опытного объекта на всех секциях была близкой – в пределах 2,41–2,63, что соответствует «слабой» (до 2,5) и «средней» (2,6 и более) степени деградации древостоя [12]. Результаты наблюдений показывают, что восстановление дубрав происходило достаточно быстро, и уже к 2014 г. на всех секциях произошло существенное улучшение санитарного состояния древостоев, выразившееся в изменении значения СКС по запасу до 1,18–1,91. При этом наиболее низкое значение СКС наблюдалось не на контрольной секции, а на секции 4, где проводилась рубка по упрощенной технологии и старый сухостой не вырубался.

В дальнейшем оставшиеся сухостойные деревья переходили в разряд валежа. Это содействовало изменению значения СКС на всех секциях до 1,32–1,39 к 2022 г., что фактически соответствует здоровому насаждению. Размер текущего отпада на всех секциях за все время наблюдений в целом совпадал с нормой, за исключением контрольной секции в 2014 г., когда его значение более чем в 2 раза превысило норму. Старый сухостой к 2010 г. накопился на различных секциях в размере 36,9–45,1 м³/га. Быст-

рое снижение его количества до 0,7–1,8 м³/га произошло к 2014 г. на секциях 2 и 3 в результате проведенных рубок. На секциях 1 и 4, где вырубка сухостоя не проводилась, уменьшение его количества происходило не столь быстро (10,1–17,8 м³/га в 2014 г.).

Фактически процесс постепенного выпадения дубового сухостоя, образовавшегося в период депрессии 2003–2008 гг., продолжается и в настоящее время. Но на тех секциях, где в 2012 г. были проведены рубки с удалением сухостойных деревьев, его количество в 2022 г. в 4–5 раз ниже (1,2–1,3 м³/га), чем на секциях, где сухостой не удалялся (5,9–6,8 м³/га).

Динамика патологических процессов. Патологические факторы, воздействующие на дубовый древостой рассматриваемого опытного объекта, можно разделить на две группы [1]. К первой относятся те, которые в период восстановления дубрав сокращают свое присутствие в древостое как на опытных секциях, так и на контрольной, и не зависят от проводимых ВСР. К ним относятся:

– *инфекционное усыхание ветвей*, пораженность которым изменяется на различных секциях от 15,3–22,7% в 2010 г. до 1,5–8,3% в 2022 г.;

– *армиллариозная гниль корней*, которая отмечена в большом количестве на секциях 1 и 2 на сухостое в 2010 г., а впоследствии лишь единично встречается на отдельных деревьях;

– *отработанные стволовыми вредителями* деревья широко встречаются на всех секциях в 2010 г. (38,4–59,7%), но впоследствии нового заселения почти не происходит, и доля таких деревьев постепенно снижается до 2,0–14,3% в 2022 г.

Представленные выше факторы можно отнести к стресс-зависимым, которые резко увеличивают свое присутствие в дубовых древостоях в период депрессии, а затем также быстро сокращают его на этапе восстановления. Наблюдения показывают – природа этих патологий такова, что в восстановительный период они почти не нуждаются в искусственном регулировании посредством проведения в дубравах санитарно-оздоровительных мероприятий.

Иная ситуация имеет место со второй группой факторов, которые можно назвать стресс-независимыми или хроническими. Их присутствие в дубравах естественным образом увеличивается, в том числе на этапе восстановления. К ним относятся:

– *стволовые гнили*, пораженность которыми возросла на контрольной секции с 1,5% в 2010 г. до 8,6% в 2022 г.;

– *поперечный рак дуба*, увеличивший свое присутствие на контрольной секции с 7,6% в 2010 г. до 12,8% в 2022 г.;

– *деревья с морозными трещинами*, которые на контрольной секции стали чаще встречаться в 2022 г. (24,1%) по сравнению с 2010 г. (18,2%).

Выборочные санитарные рубки показали себя эффективной мерой по снижению пораженности древостоев стволовыми гнилями и повреждению морозными трещинами. На всех опытных секциях сразу после рубки произошло резкое снижение доли деревьев, пораженных гнилевыми болезнями, причем чем выше была интенсивность рубки, тем это снижение больше. Так, на секции с интенсивной технологией рубки доля деревьев с признаками гнилей снизилась в 6,0 раза, с традиционной – в 3,8 раза, с упрощенной – в 2,8 раза. После проведения рубки на опытных секциях 2 и 3 также идет процесс постепенного увеличения количества пораженных гнилью деревьев. Но и через 10 лет доля этих деревьев значительно меньше, чем была до проведения мероприятия. На секции 4 количество пораженных гнилью дубов продолжает сокращаться. Доля деревьев с морозными трещинами сразу после рубки также сократилась на опытных секциях в 1,6–3,7 раза, а впоследствии на секциях 3 и 4 несколько увеличилась, так и не достигнув за 10 лет первоначального уровня.

На секциях 2 и 4 проведенная рубка содействовала снижению количества деревьев, пораженных поперечным раком дуба. Доля этих деревьев снизилась в 2,0 и 1,4 раза соответственно. На секции 3 рубка практически не повлияла на пораженность деревьев этим заболеванием. Через 10 лет после проведения рубки доля пораженных поперечным раком деревьев на секциях 2 и 4 незначительно возросла.

Таким образом, ВСР оказались эффективной мерой снижения пораженности древостоев стволовыми гнилями, поперечным раком дуба и повреждений морозными трещинами. Защитный эффект рубок на большинстве секций по отношению к этим факторам продолжается более 10 лет.

Заключение. В обобщенном виде результаты 10-летних наблюдений после проведения экспериментальных рубок на рассматриваемом опытном объекте следующие.

1. В процессе ВСР в средневозрастном и среднеполнотном дубовом древостое было заготовлено от 29 до 99 м³/га древесины дуба. При этом наибольшую интенсивность выборки обеспечила традиционная технология отбора деревьев в рубку.

2. На всех опытных секциях через 10 лет после рубки полнота древостоя достигла или превысила исходные параметры.

3. На контрольной секции увеличение запаса древостоя за период 2010–2022 гг. составило 119 м³/га. В то же время на опытных секциях объем заготовленной древесины и увеличение запаса древостоя за тот же период суммарно составили: секция 2 (интенсивная) – 157 м³/га, секция 3 (традиционная) – 196 м³/га, секция 4 (упрощенная) – 109 м³/га.

4. Средневзвешенная категория состояния деревьев дуба, которая вычислена по объему стволов, на контрольной и всех опытных секциях в 2022 г. фактически одинакова (1,32–1,39). Это означает, что через 10 лет санитарное состояние дубового древостоя выравнивается даже без проведения ВСР.

5. Объем старого сухостоя на контрольной секции постепенно уменьшается с 36,9 м³/га в 2010 г. до 6,8 м³/га в 2022 г. Но через 10 лет после рубки на всех опытных секциях его количество продолжает быть меньше (1,2–5,9 м³/га), чем на контрольной.

6. Проведение ВСР различной интенсивности существенно уменьшило встречаемость на опытных секциях таких патологий, как стволовые гнили, поперечный рак и морозные трещины. Через 10 лет после рубки на опытных секциях встречаемость этих патологий не достигла первоначальной величины, а на контрольной их встречаемость продолжает расти.

Практические выводы.

1. Проведение ВСР в средневозрастном и среднеполнотном дубовом древостое с долей участия дуба в составе 7–10 единиц позволяет дополнительно использовать в народном хозяйстве от 29 до 99 м³/га древесины в зависимости от применяемой технологии рубки.

2. Через 10 лет после проведения рубки восстанавливается первоначальная полнота древостоев и значительно увеличивается их запас. Но для достижения запаса и полноты контрольной секции, т. е. полного восстановления продуктивности древостоя необходимо больше времени.

3. Санитарное состояние на контрольной и опытных секциях через 10 лет после рубки выравнивается. Процесс накопления старого сухостоя после рубки замедляется. Пораженность стволовыми гнилями, поперечным раком и повреждение морозными трещинами после рубки снижаются, и этот лесозащитный эффект сохраняется более 10 лет.

4. По некоторым данным, санирующий эффект ВСР в дубравах лесостепной зоны может продолжаться более 20 лет [13]. Поэтому опыт-

ный объект требует дальнейших наблюдений для определения продолжительности действия защитного эффекта различных технологий ВСР и периода полного восстановления продуктивности древостоев после рубок в условиях Беларуси.

Рекомендации производству. В условиях сокращения патологических процессов в хвойных лесах республики часть освободившихся ресурсов лесного хозяйства целесообразно направить на оздоровление дубрав. По результатам лесопатологического мониторинга дубравы в некоторых регионах Беларуси, несмотря на длительный период восстановления (с 2009 г.), имеют высокую долю насаждений с нарушенной устойчивостью, обусловленную поражением их патологическими факторами хронического действия, такими как стволовые гнили, поперечный рак, морозные трещины и др. Эффективных механизмов по оздоровлению этих насаждений в рамках действующей нормативно-технической базы лесного хозяйства не существует. Поэтому назрела необходимость продолжить финансируемые исследования проблемы оздоровления белорусских дубрав, которые были свернуты в 2010 г., а также внести изменения в некоторые методические [1] и нормативно-технические [8] документы на основании недавно полученных результатов полевых экспериментов.

1. Предусмотреть возможность в [1, 8] проведения ВСР в дубравах с очагами хронических болезней и повреждений, в том числе при отсутствии в них повышенного количества текущего отпада.

2. Включить в санитарные правила и рекомендации [1, 8] предлагаемую шкалу категорий состояния деревьев дуба, предназначенную для отбора их в рубку (табл. 1).

3. Предусмотреть в этих документах [1, 8] возможность проведения различных вариантов ВСР в дубравах в возрастном диапазоне 40–100 лет, с долей дуба в составе древостоя 7–10 единиц и полнотой от 0,6 и выше, пораженных хроническими болезнями в средней и сильной степени (табл. 2).

Направления дальнейших исследований. В настоящий момент экспериментально подтверждены положительные результаты применения предлагаемой шкалы (табл. 1) и различных видов ВСР в средневозрастных искусственных насаждениях средней полноты с высокой долей дуба в составе древостоя. Необходима дальнейшая проверка данной шкалы с проведением экспериментальных рубок в смешанных насаждениях естественного

происхождения, расположенных в разных геоботанических подзонах. Желательным также является расширение возрастного диапазона древостоев, в которых проводятся экспериментальные рубки. Поскольку закладка подобных опытных объектов и проведение на них многолетних исследований является трудоемким мероприятием, его целесообразно осуществлять в рамках отдельного финансируемого исследовательского проекта, направленного на решение комплексной проблемы поддержания устойчивости и повышения площади дубрав Беларуси.

При проведении ВСП в смешанных дубравах с долей дуба в составе 4–6 единиц вырубка больших деревьев дуба может приводить к сокращению его доли в составе древостоев. Чтобы предотвратить это нежелательное явление одновременно с вырубкой дубов нужно будет удалять и часть деревьев сопутствующих пород, в том числе без признаков ослабления. Это означает, что при доле дуба менее 70% от состава древостоя более эффективными могут оказаться не ВСП, а рубки ухода. Таким образом, в ходе дальнейших исследований встает вопрос расширения диапазона применимости рубок ухода на средневозрастные и приспевающие дубовые насаждения полнотой 0,6–0,7 с нарушенной устойчивостью как способа их оздоровления.

Побочным результатом вышеописанных экспериментальных выборочных санитарных рубок оказалось доказательство того, что восстановление полноты и увеличение запаса после проведения данного вида рубок в средневозрастных среднеполнотных дубовых древостоях происходит достаточно быстро. Поэтому исследования по применению рубок ухода в этих условиях с целью оздоровления дубрав являются перспективными.

Ожидаемые результаты. По данным лесного кадастра за 2021 г. [7], площадь средневозрастных и приспевающих дубрав в Беларуси составляет 175 852 га, или 63% от их общей площади. Мы предлагаем проводить ВСП, а впоследствии и рубки ухода с целью оздоровления древостоев прежде всего в насаждениях

средней полноты (0,6–0,7), ограничив их проведение в низкополнотных дубравах (как исключение, ВСП можно проводить в отдельных низкополнотных насаждениях, где текущий отпад превышает норму). Площадь среднеполнотных дубрав из возрастной группы «Средневозрастные и приспевающие» составляет 128 879 га.

На основании данных экспедиционных лесопатологических обследований 20 лесхозов Беларуси, проведенных за последние 5 лет (2018–2022 гг.), средняя доля насаждений с нарушенной устойчивостью среди дубрав составляет 24,5%. Допустим, что в проведении ВСП и рубок ухода с учетом представленных выше предложений нуждается половина насаждений с нарушенной устойчивостью. Тогда площадь средневозрастных и приспевающих дубрав, нуждающихся в проведении лесозащитных мероприятий, можно оценить в $128\,879 \cdot 0,245 \cdot 0,5 = 15\,787$ га.

Если реализовать наши предложения по оздоровлению дубрав с нарушенной устойчивостью посредством проведения в них выборочных санитарных рубок и рубок ухода и допустить, что вырубаемый запас в них в среднем составит $50 \text{ м}^3/\text{га}$, тогда возможный к заготовке объем достигнет 789,4 тыс. м^3 древесины. Для сравнения: объем заготовки всеми видами рубок в твердолиственных лесах республики в 2021 г. составил 432,2 тыс. м^3 , в том числе по главному пользованию – 121,9 тыс. м^3 .

Таким образом, при внесении предлагаемых изменений в нормативно-технические и методические документы появится возможность не только улучшить лесопатологическое состояние дубовых насаждений, но и дополнительно вовлечь в использование значительный объем ценной дубовой древесины, которая в настоящий момент не может быть использована вследствие несовершенства имеющейся нормативной базы лесного хозяйства.

Авторы выражают искреннюю признательность специалистам РУП «Белгослес» и Гомельского опытного лесхоза, участвовавшим в разное время в проведении работ на опытном объекте.

Список литературы

1. Рекомендации по защите дубовых насаждений от воздействия неблагоприятных биотических факторов. Минск: Минлесхоз, 2011. 19 с.
2. Лосицкий К. Б. Явления депрессии в твердолиственных лесах // Лесное хозяйство. 1975. № 12. С. 40–44.
3. Лосицкий К. Б. Дубравы Белорусской ССР // Дубравы СССР. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952. Том IV. С. 3–72.
4. Кожевников А. М., Гримальский В. И. Пути улучшения лесопатологического состояния дубрав Белоруссии // Лесное хозяйство. 1985. № 3. С. 52–55.

5. Сазонов А. А. Оценка последствий массового усыхания дубовых лесов Беларуси 2003–2008 гг. // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2009. Вып. XVII. С. 304–307.
6. Обзор лесопатологического и санитарного состояния лесного фонда Республики Беларусь за 2021 год и прогноз развития патологических процессов в 2022 году. Ждановичи: Беллесозащита, 2022. 84 с.
7. Государственный лесной кадастр Республики Беларусь по состоянию на 01.01.2022. Минск: Белгослес, 2022. 90 с.
8. Об утверждении Санитарных правил в лесах Республики Беларусь: постановление М-ва лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 19 дек. 2016 г., № 79 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. 2016. 8/31603.
9. Блинецов А. И., Сазонов А. А. Новые подходы к проведению выборочных санитарных рубок в дубравах // Лесное и охотничье хозяйство. 2010. № 6. С. 19–26.
10. Сазонов А. А. Пути совершенствования санитарно-оздоровительных мероприятий в дубравах Беларуси // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2011. Вып. 196. С. 254–262.
11. Правила рубок леса в Республике Беларусь: ТКП 143-2008 (02080). URL: <https://tnpa.by/#!/DocumentCard/216971/314417> (дата обращения: 22.09.2022).
12. Защита леса / В. Б. Звягинцев [и др]. Минск: БГТУ, 2019. 164 с.
13. Царалунга В. В. Санитарные рубки в дубравах: обоснование и оптимизация. М.: МГУЛ, 2003. 240 с.

References

1. *Rekomendatsii po zashchite dubovykh nasazhdeniy ot vozdeystviya neblagopriyatnykh bioticheskikh faktorov* [Recommendations for the protection of oak plantations from the impact of adverse biotic factors]. Minsk, Minleskhoz Publ., 2011. 19 p. (In Russian).
2. Lositskiy K. B. Depression phenomena in hardwood forests. *Lesnoye khozyaystvo* [Forestry], 1975, no. 12, pp. 40–44 (In Russian).
3. Lositskiy K. B. Oak forests of the Belorussian SSR. *Dubravyy SSSR* [Oak forests of the USSR]. Moscow; Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1952, vol. IV, pp. 3–72 (In Russian).
4. Kozhevnikov A. M., Grimal'skiy V. I. Ways to improve the forest pathological state of oak forests in Belarus. *Lesnoye khozyaystvo* [Forestry], 1985, no. 3, pp. 52–55 (In Russian).
5. Sazonov A. A. Assessment of the consequences of mass drying out of oak forests in Belarus in 2003–2008. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series I, Forestry, 2009, issue XVII, pp. 304–307 (In Russian).
6. *Obzor lesopatologicheskogo i sanitarnogo sostoyaniya lesnogo fonda Respubliki Belarus' za 2021 god i prognoz razvitiya patologicheskikh protsessov v 2022 godu* [Review of the forest pathological and sanitary state of the forest fund of the Republic of Belarus for 2021 and a forecast for the development of pathological processes in 2022]. Zhdanovichi, Bellesozashchita Publ., 2022. 84 p. (In Russian).
7. *Gosudarstvennyy lesnoy kadastr Respubliki Belarus' po sostoyaniyu na 01.01.2022* [State Forest Cadastre of the Republic of Belarus as of 01/01/2022]. Minsk, Belgosles Publ., 2022. 90 p. (In Russian).
8. On approval of Sanitary forest regulations in the Republic of Belarus: decree of the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus, December 19, 2016, no. 79. *Natsional'nyy reestr pravovykh aktov Respubliki Belarus'* [National Register of Legal Acts of the Republic of Belarus], 2016. 8/31584 (In Russian).
9. Blintsov A. I., Sazonov A. A. New approaches to selective sanitary felling in oak forests. *Lesnoye i ohotnich'ye khozyaystvo* [Forestry and hunting], 2010, no. 6, pp. 19–26 (In Russian).
10. Sazonov A. A. Ways to improve sanitary measures in the oak forests of Belarus. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy], 2011, issue 196, pp. 254–262 (In Russian).
11. ТКП 143-2008 (02080). Rules for logging in the Republic of Belarus. Available at: <https://tnpa.by/#!/DocumentCard/216971/314417> (accessed 09/22/2022) (In Russian).
12. 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. (In Russian).
13. Tsaralunga V. V. *Sanitarnyye rubki v dubravakh: obosnovaniye i optimizatsiya* [Sanitary cuttings in oak forests: substantiation and optimization]. Moscow, MGUL Publ., 2003. 240 p. (In Russian).

Информация об авторах

Сазонов Александр Александрович – начальник лесоустроительной партии 1-й Минской лесоустроительной экспедиции. РУП «Белгослес» (220089, г. Минск, ул. Железнодорожная, 27/1, Республика Беларусь). E-mail: lesopatolog@rambler.ru

Бабуль Дмитрий Александрович – инженер-таксатор I категории 1-й Минской лесоустроительной экспедиции. РУП «Белгослес» (220089, г. Минск, ул. Железнодорожная, 27/1, Республика Беларусь). E-mail: babuld@bk.ru

Пацукевич Павел Викторович – инженер-лесопатолог 1-й Минской лесоустроительной экспедиции. РУП «Белгослес» (220089, г. Минск, ул. Железнодорожная, 27/1, Республика Беларусь). E-mail: pavel_photo@inbox.ru

Information about the authors

Sazonov Aleksandr Aleksandrovich – Head of the forest management party, the 1st Minsk Forest Inventory Expedition. Republican Unitary Enterprise “Belgosles” (27/1, Zheleznodorozhnaya str., 220089, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lesopatolog@rambler.ru

Babul’ Dmitry Aleksandrovich – appraiser engineer of the 1st category, the 1st Minsk Forest Inventory Expedition. Republican Unitary Enterprise “Belgosles” (27/1, Zheleznodorozhnaya str., 220089, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: babuld@bk.ru

Patsukevich Pavel Viktorovich – forest pathologist engineer, the 1st Minsk Forest Inventory Expedition. Republican Unitary Enterprise “Belgosles” (27/1, Zheleznodorozhnaya str., 220089, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pavel_photo@inbox.ru

Поступила 01.03.2023

УДК 595.782:632.782(476-21)

Н. В. Синчук, С. В. Буга

Белорусский государственный университет

**ХАРАКТЕР ПОВРЕЖДЕННОСТИ ЛИСТОВЫХ ПЛАСТИНОК
ТОПОЛЯ БЕРЛИНСКОГО (*POPULUS* × *BEROLINENSIS*)
ЛИЧИНКАМИ ТОПОЛЕВОЙ МОЛИ-ПЕСТРЯНКИ (*PHYLLONORYCTER*
POPULIFOLIELLA) В ГОРОДАХ БЕЛАРУСИ**

Тополь (*Populus* spp.) широко использовались в озеленении населенных пунктов Республики Беларусь в послевоенный период. В отдельных городах имеются разновозрастные посадки отдельных видов и форм тополей, характеризующихся разной устойчивостью к болезням и вредителям. Тополевая моль-пестрянка (*Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833)) является минирующим вредителем тополей, для которого характерны регулярные вспышки массового размножения, ведущие к потере посадками тополей эстетической ценности. Тополь берлинский (*Populus* × *berolinensis* (Koch) Dippel) имеет в Беларуси ограниченное распространение, но очень сильно повреждается данным вредителем в зеленых насаждениях ряда городов. В 2021–2022 гг. выполнены исследования поврежденности листовых пластинок тополя берлинского *P.* × *berolinensis* в зеленых насаждениях Витебска и Минска по окончании развития личинок первой и второй генерации тополевой моли-пестрянки *Ph. populifoliella*. Общая относительная площадь поврежденной листовой поверхности тополя берлинского в зеленых насаждениях Витебска достигала 32,18% в 2021 г. и 65,88% в 2022 г., в Минске – 96,62 и 85,17% соответственно. Отмечены статистически значимые ($p < 0,05$) различия поврежденности листовых пластинок, а также среднего числа мин на них.

Ключевые слова: зеленые насаждения, минирующие моли, вредители декоративных растений, уровень урона, Gracillariidae.

Для цитирования: Синчук Н. В., Буга С. В. Характер поврежденности листовых пластинок тополя берлинского (*Populus* × *berolinensis*) личинками тополевой моли-пестрянки (*Phyllonorycter populifoliella*) в городах Беларуси // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 100–109. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-12.

N. Sinchuk, S. Buga

Belarusian State University

**THE NATURE OF THE DAMAGE TO THE LEAF BLADES OF BERLIN POPLAR
(*POPULUS* × *BEROLINENSIS*) BY LARVAE OF THE POPLAR MOTH
(*PHYLLONORYCTER POPULIFOLIELLA*) IN THE CITIES OF BELARUS**

Poplars (*Populus* spp.) were widely used in landscaping settlements in the post-war period in Belarus. In some cities there are plantings of different types and forms of poplars of different ages, characterized by different resistance to diseases and pests. The poplar moth (*Phyllonorycter populifoliella* Treitschke, 1833) is the one of the main pests of poplars, which is characterized by regular outbreaks of mass reproduction, which lead to the loss of aesthetic value of poplar plantings. The Berlin poplar (*Populus* × *berolinensis* (Koch) Dippel) has a limited distribution in Belarus, and is damaged by this pest in some cities. In 2021–2022 studies of the damage to the leaf blades of Berlin poplar *P.* × *berolinensis* at the end of the development of the first and second generation of larvae of poplar moth *Ph. populifoliella* in Belarus were carried out. The total relative area of the damaged leaf blades of Berlin poplar in Vitebsk was 32,18% in 2021 and 65,88% in 2022, in Minsk – 96,62 and 85,17%. Statistically significant ($p < 0,05$) differences in the damage to the leaf blades, as well as the average number of mines on them, were noted.

Keywords: green stands, leaf-mining insects, pests of ornamental plants, damage level, Gracillariidae.

For citation: Sinchuk N., Buga S. The nature of the damage to the leaf blades of Berlin poplar (*Populus* × *berolinensis*) by larvae of the poplar moth (*Phyllonorycter populifoliella*) in the cities of Belarus // *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 100–109. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-12 (In Russian).

Введение. Представители рода *Populus* L. К числу дикорастущих в условиях Беларуси при- широко распространены в Северном полушарии. надлежат произрастающие в лесах и в поймах

рек осина, или тополь дрожащий (*P. tremula* L.), осокорь, или тополь черный (*P. nigra* L.), а также тополь белый, или серебристый (*P. alba* L.) [1, 2].

Начало широкой интродукции тополей в Беларуси относится ко второй половине XIX–началу XX века, когда в посадках начали использоваться новые, ранее не вводившиеся в насаждения древесные породы, среди которых были и тополя [3]. Легкость вегетативного размножения, неприхотливость и высокая скорость роста обеспечили их популярность как декоративных и технических культур. Они широко использовались при создании зеленых насаждений населенных пунктов, ветрозащитных лесополос вдоль транспортных путей. Древесина тополя используется в производстве фанеры, пиломатериалов, целлюлозы и в качестве топлива [4]. К началу нынешнего столетия в Беларуси в культуру было введено 17 видов, 2 формы и 23 гибрида [2]. Для ряда видов и гибридов тополей отмечается более продолжительный рост в течение вегетационного периода, а также поздняя дефолиация осенью, благодаря чему они дольше сохраняют декоративность в зеленых насаждениях населенных пунктов. Облиственные кроны способствуют очищению воздуха, в том числе за счет клейкой поверхности или опушенности листовых пластинок [5].

В то же время широкое использование тополей в декоративных посадках ограничено низкой устойчивостью к вредителям и инфекционным заболеваниям. Вспышки массового размножения вредителей и эпифитотии могут катастрофически снижать эстетическую и санитарно-гигиеническую ценность насаждений. Круг бактериальных и грибных патогенов, листогрызущих, сосущих и стволовых фитофагов тополя обширен – более 500 видов из разных таксонов [6].

Среди листовых фитофагов-минеров высоким уровнем вредоносности отличается тополевая моль-пестрянка (*Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833)), личинки которой уже на первой генерации повреждают до 71% листовой поверхности с нижней стороны листовых пластинок тополей [7]. Условия высокой антропогенной нагрузки способствуют вспышкам массового размножения листовых минеров и формированию популяционных группировок с высокой плотностью этих фитофагов. Интенсивность повреждения тополей вредителями находится в зависимости от степени ослабления растений под воздействием ряда факторов среды [8], в результате чего существенно снижается декоративность посадок тополей и происходит преждевременная частичная дефолиация крон, которая отмечается в Беларуси уже в конце июня – в начале июля, с завершением развития личинок первого поколения *Ph. populifoliella* [9].

Populus × berolinensis Dippel – естественный межсекционный гибрид *P. laurifolia* Ledeb. × *P. nigra* L. var. *Italica*, случайным образом полученный в Ботаническом саду Берлина приблизительно в 1865 г. [10, 11]. Время интродукции в Беларусь точно не установлено [12]. Гибрид быстрорастущий, цветет, но не плодоносит. Обладает хорошей морозостойкостью, неприхотлив к условиям произрастания, загазованность не оказывает значительного влияния на рост и фитосанитарное состояние. Декоративность высока за счет красивой густой пирамидальной кроны и темно-зеленой окраски листы [13].

Целью исследования являлась характеристика поврежденности листовых пластинок тополя берлинского тополевой моль-пестрянкой в зеленых насаждениях городов Беларуси по окончании развития личинок первой и второй генераций исследуемого филлофага.

Материалы и методы исследований.

Для оценки характера поврежденности листовых пластинок тополя берлинского по завершении периода развития личинок первой и второй генерации тополевой моли-пестрянки (*Ph. populifoliella*) был проведен их отбор с экземпляров *P. × berolinensis*, данные о местопроизрастании которых представлены в табл. 1.

Обследованиями были охвачены посадки тополя берлинского и в других городах Беларуси (в частности, в Гродно и Бресте), однако для произрастающих там экземпляров не удалось сформировать репрезентативные выборки листовых пластинок, в том числе ввиду низкой заселенности листьев минерами.

Отбор листы проводился случайным образом (рандомизированно) с нижней части крон. Листовые пластинки собирали для исключения потери влаги в фасовочные полиэтиленовые пакеты типа Zip-Lock, от 30 листы с каждого исследуемого растения; туда же вкладывали рабочую (временную) этикетку, на которой указывали таксон растения, дату и место сбора, уровень заселенности, ФИО коллектора [14]. Для сохранения минированных личинками *Ph. populifoliella* листовых пластинок в пригодном для дальнейшей камеральной обработки состоянии материал закладывали в течение суток после сбора в гербарный пресс с использованием газетной бумаги в качестве переслаивающего материала. Для ускорения высушивания и во избежание потемнения по листовым пластинкам проходили умеренно горячим утюгом (70°C), при этом их укладывали между газетными листами с целью избегания механического повреждения листы и мин (это особенно «полезно» для подготовки материала, собранного в период развития личинок второй генерации тополевой моли-пестрянки, с августа по сентябрь).

Таблица 1
**Местопроизрастание обследованных экземпляров
 тополя берлинского (*Populus × berolinensis*
 (Koch) Dippel)**

Тополь	Местоположение	Координаты
Минск		
Ber1M	Пл. Богушевича	53.895480 27.539962
Ber2M	Ул. Буденного	53.884190 27.614130
Ber3M	Ул. Заводская	53.888595 27.585398
Ber4M	Стадион «Трактор» (1)	53.880296 27.616582
Ber5M	Стадион «Трактор» (2)	53.880121 27.616662
Ber6M	Ул. Ленинградская	53.893722 27.551115
Витебск		
Ber1V	Московский проспект	55.181017 30.209196
Ber2V	Парк по набережной реки Витьба (1)	55.195832 30.207772
Ber3V	Ул. Энгельса	55.195278 30.194722
Ber4V	Парк по набережной реки Витьба (2)	55.195990 30.207771

Хранение гербарных сборов осуществлялось в Zip-Lock пакетах и бумажных конвертах форматов А4 и А5, в которые отсортировывались листовые пластинки с исследуемого растения согласно стороне повреждения: отдельно откладывались листья с верхнесторонними, нижнесторонними и одновременно с верхне- и нижнесторонними повреждениями, что сопровождалось дополнительным этикетированием с указанием сторон листовой пластинки с обнаруженными на них повреждениями: такое разделение на отдельные группы поврежденных личинками тополевой моли-пестрянки листовых пластинок в последующем облегчило обработку материала. Отсортированные выборки листовых пластинок помещали в большие конверты и бумажные пакеты для постоянного хранения. На внешнюю сторону конверта прикалывали этикетки. Конверты складировали в пластмассовые прозрачные ящики и хранили в закрытом помещении при комнатной температуре.

Для идентификации видовой принадлежности минеров по повреждениям использовали иллюстрированный определитель [15]. Дополнительно осуществляли выведение имаго из листовых мин для верификации определения. Идентификацию имаго осуществляли с использованием специализированных ключей и определителей [16, 17].

Поврежденные листья сканировали на планшетном сканере Canon CanoScan 9000F Mark II (разрешение 600 dpi) с введением в область сканирования полоски миллиметровой бумаги, сопроводительной этикетки и маркировочной этикетки для обозначения стороны повреждения листовой пластинки (рис. 1).

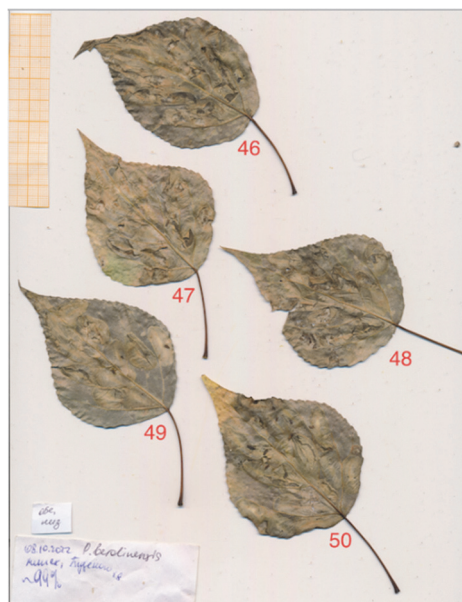


Рис. 1. Фотоизображение поврежденных личинками второй генерации тополевой моли-пестрянки (*Phyllonorycter populifoliella*) листовых пластинок тополя берлинского (*Populus × berolinensis*)

Поврежденность оценивалась на основании данных по площади поврежденной личинками тополевой моли-пестрянки поверхности верхней и нижней сторон листовых пластинок.

Для установления площади мин, изображения, полученные сканированием на планшетном сканере, обрабатывали средствами специализированного графического редактора ImageJ [18]. Полученные данные заносили в электронные таблицы.

Анализ фотоизображений предполагал установление площади отдельных мин (см²), общей (суммарной) площади мин на отдельных листовых пластинках (см²), относительной площади поврежденной листовой поверхности (поврежденности) листовых пластинок (%). С использованием полученных выборочных совокупностей были выполнены расчеты среднего числа мин на листовую пластинку с каждой из сторон (верхнесторонние, нижнесторонние мины или повреждения с обеих сторон).

Статистический анализ проводили средствами программы RStudio. С целью установления достоверности различий между выборочными совокупностями использовали непараметрический критерий Уилкоксона – Манна – Уитни [19].

Авторы признательны заведующему кафедрой ботаники Белорусского государственного университета кандидату биологических наук, доценту Тихомирову В. Н. за помощь в определении таксономической принадлежности тополей в ходе проводимых исследований экологии тополевой моли-пестрянки. Исследования выполнялись в рамках задания государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 годы (номер ГР НИР 20211658).

Основная часть. Полученные на период по окончании развития личинок тополевой моли-

пестрянки первой и второй генерации значения показателей заселенности листовых пластинок исследуемых тополей в Минске и Витебске представлены на рис. 2. Данные диаграммы указывают на чрезвычайно широкий диапазон варьирования показателя, – несмотря на принадлежность к одному и тому же клону.

В табл. 2 представлены значения показателей поврежденности листовых пластинок (относительной площади поврежденной листовой поверхности) исследуемых тополей в Беларуси по окончании развития личинок тополевой моли-пестрянки первой и второй генерации.

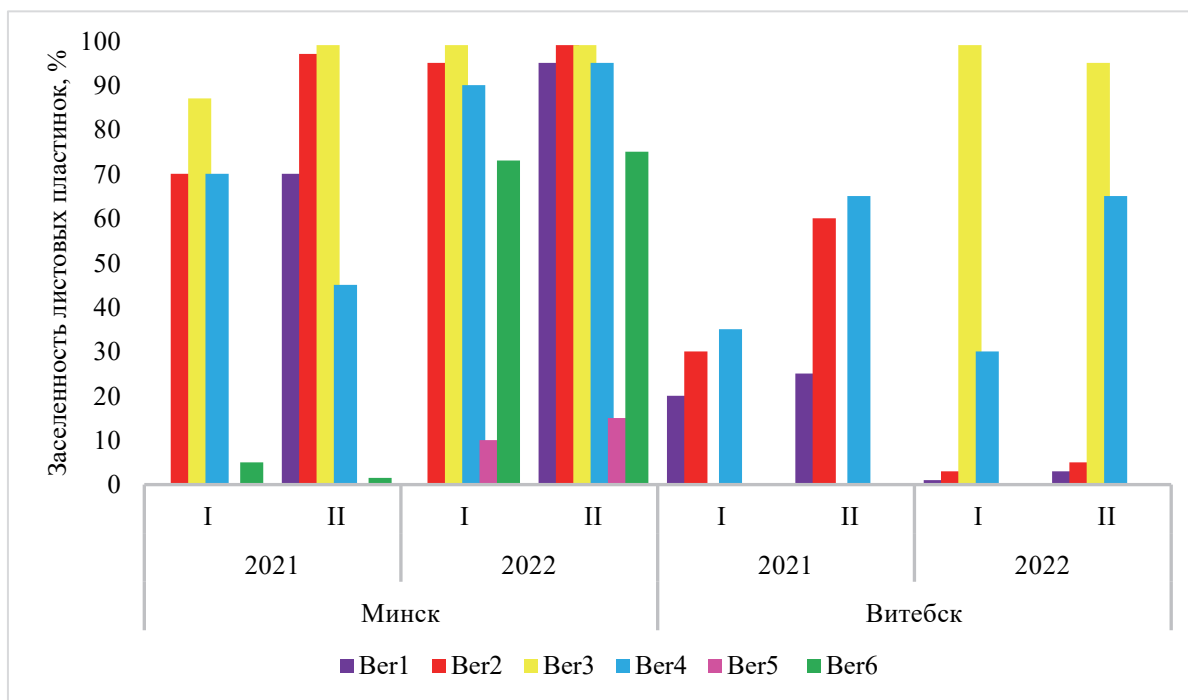


Рис. 2. Заселенность тополевой молью-пестрянкой (*Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833)) листовых пластинок исследуемых экземпляров тополя берлинского (*Populus × berolinensis* (Koch) Dippel) в зеленых насаждениях городов Беларуси в 2021–2022 гг.

Таблица 2

Общая поврежденность (%) листовых пластинок исследуемых экземпляров тополей *Populus × berolinensis* (Koch) Dippel (зеленые насаждения Витебска и Минска, 2021–2022 гг.)

Экземпляр	2021		2022	
	1-я генерация	2-я генерация	1-я генерация	2-я генерация
Ber1M	–	0,39–60,22	–	3,34–52,76
Ber2M	5,62–68,90	0,82–96,62	0,38–89,87	1,34–85,17
Ber3M	5,21–99,23	1,53–94,26	0,81–90,35	0,73–62,83
Ber4M	0,16–45,35	2,25–48,07	1,22–61,87	3,30–55,91
Ber5M	–	–	3,08–26,30	3,21–31,13
Ber6M	0,81–18,18	4,03–28,00	4,03–46,18	3,08–46,33
Ber1V	0,74–12,18	0,40–9,70	0,42–17,76	0,42–11,80
Ber2V	0,42–18,51	0,68–32,18	2,55–33,27	0,03–22,24
Ber3V	–	–	0,77–65,88	1,32–65,22
Ber4V	0,19–21,71	27–15,83	1,60–20,98	0,56–10,67

Статистический анализ общей поврежденности листовых пластинок *P. × berolinensis* личинками *Ph. populifoliella* показал, что существуют статистически значимые различия ($p < 0,05$) для выборок:

- для первой генерации тополевой моли-пестрянки в 2021 и 2022 гг. в Витебске ($p = 5,733e-10$);
- для первой генерации тополевой моли-пестрянки в Минске и Витебске в 2021 г. ($p = 2,2e-16$);
- для второй генерации тополевой моли-пестрянки в Минске и Витебске в 2021 г. ($p = 2,2e-16$);
- для первой генерации тополевой моли-пестрянки в Минске и Витебске в 2022 г. ($p = 4,08e-15$);
- для второй генерации тополевой моли-пестрянки в Минске и Витебске в 2022 г. ($p = 2,2e-16$).

Таким образом, общая поврежденность листовых пластинок не только статистически значимо возрастает от первой ко второй генерации, что является следствием «накопления вредителя и повреждений», но также различается по годам и между зелеными насаждениями Минска и Витебска.

Среднее число мин личинок 1-й генерации тополевой моли-пестрянки на листовых пластинках тополя берлинского в 2021 г. представлено в табл. 3.

Различия между средним числом мин на листовой пластинке не были статистически достоверны ($p > 0,05$) для всех выборок как при односторонних, так и при двусторонних повреждениях, как для зеленых насаждений Минска, так и для Витебска.

Данные по среднему числу мин разной локализации на листовых пластинках для экземпляров, произрастающих в зеленых насаждениях Минска, представлены в табл. 4.

Таблица 3

Среднее число мин личинок 1-й генерации тополевой моли-пестрянки (*Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833)) на листовых пластинках исследуемых экземпляров тополей в 2021 г.

Экземпляр	Среднее число мин на листовых пластинках, экз./лист				
	общее	при односторонних повреждениях		при двусторонних повреждениях	
		верхнесторонние мины	нижнесторонние мины	верхнесторонние мины	нижнесторонние мины
Ber2M	10,10	–	6,65	1,93	10,64
Ber3M	11,14	–	6,18	3,23	12,53
Ber4M	8,32	–	7,54	1,73	8,40
Ber6M	1,33	–	1,33	–	–
Ber1V	1,23	1,00	1,24	–	–
Ber2V	1,45	1,28	1,33	1,20	1,60
Ber4V	1,93	–	1,78	1,00	1,63

Таблица 4

Среднее число мин личинок 2-й генерации тополевой моли-пестрянки (*Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833)) на листовых пластинках исследуемых экземпляров тополей в 2021 г.

Экземпляр	Среднее число мин на листовых пластинках, экз./лист				
	общее	при односторонних повреждениях		при двусторонних повреждениях	
		верхнесторонние мины	нижнесторонние мины	верхнесторонние мины	нижнесторонние мины
Ber1M	11,74	–	11,81	1,85	9,77
Ber2M	19,88	–	18,00	3,19	17,28
Ber3M	18,13	–	10,13	3,08	17,71
Ber4M	5,28	5,00	4,26	2,14	8,29
Ber6M	3,38	–	3,38	–	–
Ber1V	1,71	–	1,71	–	–
Ber2V	2,98	2,00	3,03	1,00	2,00
Ber4V	1,98	1,33	2,10	2,00	2,00

Таблица 5

Среднее число мин личинок 1-й генерации тополевой моли-пестрянки (*Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833)) на листовых пластинках исследуемых экземпляров тополей в 2022 г.

Экземпляр	Среднее число мин на листовых пластинках, экз./лист				
	общее	при односторонних повреждениях		при двусторонних повреждениях	
		верхнесторонние мины	нижнесторонние мины	верхнесторонние мины	нижнесторонние мины
Ber2M	17,63	–	14,41	2,11	19,26
Ber3M	12,69	–	9,58	1,57	14,65
Ber4M	5,40	–	5,19	1,00	6,67
Ber5M	1,87	1,00	1,91	–	–
Ber6M	3,70	–	3,70	–	–
Ber1V	1,84	1,00	1,87	–	–
Ber2V	1,76	1,00	1,82	–	–
Ber3V	7,71	–	7,46	1,50	11,00
Ber4V	1,77	1,20	1,59	1,25	2,00

Таблица 6

Среднее число мин личинок 2-й генерации тополевой моли-пестрянки (*Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833)) на листовых пластинках исследуемых экземпляров тополей в 2022 г.

Экземпляр	Среднее число мин на листовых пластинках, экз./лист				
	общее	при односторонних повреждениях		при двусторонних повреждениях	
		верхнесторонние мины	нижнесторонние мины	верхнесторонние мины	нижнесторонние мины
Ber1M	8,62	–	8,48	1,00	12,00
Ber2M	11,76	–	10,45	1,80	15,20
Ber3M	7,75	1,00	7,03	1,33	7,94
Ber4M	4,67	–	4,18	1,33	5,56
Ber5M	1,51	1,00	1,52	–	–
Ber6M	3,47	–	3,47	–	–
Ber1V	1,11	–	1,11	–	–
Ber2V	1,59	1,25	1,47	1,00	2,33
Ber3V	6,53	–	5,39	1,30	9,70
Ber4V	1,44	1,00	1,28	1,00	1,50

Наблюдаемые различия значений показателя среднего числа мин на листовых пластинках в большинстве пар сравнения не были статистически достоверны ($p > 0,05$) для выборок как при односторонних, так и при двусторонних повреждениях, как для зеленых насаждений Минска, так и Витебска. Исключения составляют варианты сравнения для нижнесторонних мин при односторонних повреждениях ($p = 0,03571$), а также для общего среднего числа мин личинок второй генерации выборок из зеленых насаждений Минска и Витебска ($p = 0,03571$).

Среднее число мин личинок 1-й генерации тополевой моли-пестрянки *Phyllonorycter populifoliella* в 2022 г. представлено в табл. 5.

Различия между средним числом мин на листовых пластинках не были статистически до-

стоверны ($p > 0,05$) для всех выборок как при односторонних, так и при двусторонних повреждениях, как для Минска, так и для Витебска.

При этом отмечены более высокие значения показателя среднего числа мин на листовых пластинках экземпляров тополя берлинского, произрастающих во дворах жилой застройки Минска и Витебска (Ber2M, Ber3M, Ber3V), что можно объяснить более благоприятными условиями для перезимовки тополевой моли-пестрянки, большим числом экземпляров кормовых растений и «накоплением вредителя и повреждений».

Для обследованных экземпляров тополя берлинского, произрастающих в зеленых насаждениях городов Беларуси, рассчитано среднее количество мин на листовых пластинках в зависимости

от их (мин) локализации, – соответствующие данные приведены в табл. 6.

По данным выборок в Минске и Витебске, различия между значениями показателя среднего числа мин на листовых пластинках не были статистически достоверны ($p > 0,05$) ни при односторонних, ни при двусторонних повреждениях, за исключением выборок нижнесторонних мин при односторонних повреждениях ($p = 0,0303$).

На экземплярах тополя берлинского во дворах жилых комплексов и в аллеях посадках в середине июля 2022 г. была зафиксирована вспышка массового размножения тополевой моли-пестрянки, в результате чего в конце периода развития личинок второй генерации заселенность листвы составляла 99% для экземпляров тополя берлинского в дворовых насаждениях кварталов жилой застройки.

В целом при высокой вариабельности и широких диапазонах варьирования значений показателей, характеризующих поврежденность листовых пластинок, в числе которых их заселенность, среднее число мин на них и относительная площадь поврежденной поверхности, не были выявлены статистически значимые различия значений показателя среднего числа (плотности) мин на листовых пластинках для большинства пар сравнения из зеленых насаждений Витебска и Минска, а также для вегетационных сезонов 2021–2022 гг. При этом общая поврежденность (относительная площадь поврежденной листовой поверхности) приближалась к 100% при столь же высоком уровне заселенно-

сти листвы личинками, что обуславливает катастрофическую потерю декоративности столь интенсивно поврежденными экземплярами тополя берлинского.

Заключение. Выполненные в 2021–2022 гг. исследования продемонстрировали широкую вариабельность значений показателя заселенности листовых пластинок тополя берлинского (*Populus × berolinensis*) личинками тополевой моли-пестрянки (*Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833) в зеленых насаждениях Витебска и Минска, для которых удалось получить репрезентативные выборки поврежденной листвы (рис. 3).

Визуализация полученных данных позволяет констатировать рост заселенности листовых пластинок от первой ко второй генерации *Ph. populifoliella* как естественное следствие «накопления вредителей и повреждений». При этом отдельные экземпляры *Populus × berolinensis*, несмотря на принадлежность к одному и тому же клону, оставались малозаселенными данным минером, склонным регулярно давать вспышки массового размножения. Причинами такой вариабельности значений также могут быть различия в технике уборки и удаления опада листвы с куколками минера (в разное время и/или на разных местах произрастания тополей), различия микроклиматических условий, которые могут быть благоприятными для перезимовки тополевой моли-пестрянки, большое число экземпляров кормовых растений и «накопление» фитофага.



а



б

Рис. 3. Заселенность листовых пластинок тополя берлинского (*Populus × berolinensis*) личинками первой (а) и второй (б) генераций тополевой моли-пестрянки (*Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833) в зеленых насаждениях Минска в 2022 г.

Общая относительная площадь поврежденной листовой поверхности тополя берлинского в зеленых насаждениях Витебска достигала 32,18% в 2021 г. и 65,88% в 2022 г., в Минске – 96,62 и 85,17% соответственно. Отмечены статистически значимые ($p < 0,05$) различия повреждения листовых пластинок, а в ряде случаев – и среднего числа мин на них.

Важно отметить, что указанные факторы при взаимодействии друг с другом могут приводить к различным уровням повреждения листьев тополей в разных местах произрастания и в разное время. Кроме того, данные факторы могут вызывать различные реакции у тополей в зависимости от их генетических особенностей, что дополнительно усиливает широкий диапазон вариабельности повреждений листовой поверхности тополя берлинского в зеленых насаждениях городов Беларуси.

При этом высокая вредоносность фитофага, обуславливаемая его широкой распространенностью, характером повреждений, катастрофи-

чески снижающих эстетические качества декоративных посадок, а также способностью регулярно давать вспышки массового размножения в зеленых насаждениях населенных пунктов определяют актуальность дальнейшего изучения экологии данного опасного вредителя тополей в условиях Беларуси.

Изучение характера повреждения листовых пластинок тополя молью *Phyllonorycter populifoliella* имеет важное значение для понимания экологии этого вредителя и его взаимодействия с хозяйственно полезными растениями.

Изучение взаимосвязи между характером повреждения листовых пластинок и условиями окружающей среды может помочь определить факторы, влияющие на вспышки массового размножения моли и развитие ее популяции.

Исследование характера повреждения листовых пластинок тополя тополевой молью имеет практическую значимость для разработки методов контроля за популяцией моли и защиты от ущерба, наносимого ею.

Список литературы

1. Определитель высших растений Беларуси / под ред. В. И. Парфенова. Минск: Дизайн ПРО, 1999. 471 с.
2. Шкуратова Н. В. О возможности диагностики аборигенных и интродуцированных в Республике Беларусь видов *Populus* L. по анатомическим признакам коры однолетнего стебля // Вестник Брестского университета. Сер. 5. Химия. Биология. Наука о земле. 2011. № 1. С. 63–71.
3. Мирон К. Ф. Интродукция тополей и перспектива выращивания их насаждений в лесах Белорусской ССР // Сборник научных трудов. 1958. Вып. XI: лесоводство, лесные культуры и лесное почвоведение. С. 86–109.
4. Nervo G. Current situation and prospects for European poplar culture: the role of Italian research / G. Nervo [et al.] // Third International Congress of Salicaceae in Argentina. 2011. P. 9.
5. Корлыханов М. С., Корлыханова Т. В. Пылезадерживающая способность листовой поверхности тополя свердловского серебристого пирамидального в условиях г. Екатеринбурга // Аграрный вестник Урала. 2008. № 10 (52). С. 93–94.
6. Dickmann D. I., Kuzovkina J. Poplars and willows in the world, with emphasis on silviculturally important species. Poplars and willows // Trees for society and the environment. 2014. Vol. 22 (8). P. 91.
7. Синчук Н. В., Кучвальская А. Б., Буга С. В. Поврежденность листовых пластинок *Populus × canadensis* личинками тополевой моли-пестрянки (*Phyllonorycter populifoliella*) в условиях зеленых насаждений Центрального ботанического сада НАН Беларуси в 2016–2018 гг. // Веснік МДПУ імя І. П. Шамякіна. 2020. № 2. С. 58–65.
8. Синчук Н. В., Курченко В. П. Устойчивость различных видов тополей (*Populus* spp.) к заболеваниям и комплексу вредителей // Экобиотех. 2021. Т. 4, № 3. С. 210–220.
9. Семенченко В. П. Чужеродные виды животных в естественных экосистемах Беларуси // Наука и инновации. 2018. Т. 7, № 185. С. 20–25.
10. Скворцов А. К. Систематический конспект рода *Populus* в Восточной Европе, Северной и Средней Азии // Бюллетень Главного ботанического сада. 2010. Вып. 196. С. 62–73.
11. *Populus × berolinensis* // Trees and Shrubs Online. URL: <https://treesandshrubsonline.org/articles/populus/populus-x-berolinensis/> (дата обращения: 20.10.2022).
12. Федорук А. Т. Интродуцированные деревья и кустарники западной части Белоруссии. Минск: Издательство БГУ имени В. И. Ленина, 1972. 191 с.
13. Валягина-Матюлина Е. Т. Деревья и кустарники средней полосы европейской части России: Иллюстрированный определитель. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012. 459 с.
14. Кириченко Н. И. Методические подходы к исследованию насекомых, минирующих листья древесных растений // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2014. № 207. С. 235–246.

15. Ellis W. N. *Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833) // Plant Parasites of Europe leafminers, galls and fungi. URL: <https://bladmineerders.nl/parasites/animalia/arthropoda/insecta/lepidoptera/ditrysia/gracillarioidea/gracillariidae/lithocolletinae/phyllonorycter/phyllonorycter-populifoliella/> (дата обращения: 30.09.2022).

16. A Linnaeus NG interactive key to the Lithocolletinae of North-West Europe aimed at accelerating the accumulation of reliable biodiversity data (Lepidoptera, Gracillariidae) // C. Dooreneveerd [et al.]. URL: https://lithocolletinae.linnaeus.naturalis.nl/linnaeus_ng/app/views/matrixkey/index.php?epi=9 (date of access: 30.09.2022).

17. Nel J., Varenne T. Atlas des Lépidoptères Gracillariidae Lithocolletinae de France // Revue Association Roussillonnaise d'Entomologie (R.A.R.E.). 2014. Vol. 23, Supplement. P. 1–144.

18. Количественная оценка поврежденности инвазивными минирующими насекомыми листовых пластинок декоративных древесных растений / Синчук О. В. [и др.]. Минск: БГУ, 2016. 30 с.

19. Матицкий С. Э., Шитиков В. К. Статистический анализ и визуализация данных с помощью R. М.: ДМК Пресс, 2015. 496 с.

References

1. *Opredelitel' vysshikh rasteniy Belarusi* [Key to higher plants of Belarus]. Minsk, Dizayn PRO Publ., 1999. 472 p. (In Russian).

2. Shkuratova N. V. On the possibility of diagnosing native and introduced in the Republic of Belarus species of *Populus* L. by anatomical features of the bark of an annual stem. *Vestnik Brestskogo universiteta* [Bulletin of the Brest University], series 5, Chemistry. Biology. Earth Science, 2011, no. 1, pp. 63–71 (In Russian).

3. Miron K. F. Introduction of poplars and the prospect of growing their plantations in the forests of the Belarusian SSR. *Sbornik nauchnykh trudov* [Collection of scientific papers], 1958, issue XI: forestry, forest crops and forest soil science, pp. 86–109 (In Russian).

4. Nervo G., Coaloa D., Vietto L., Giorcelli A., Allegro G. Current situation and prospects for European poplar culture: the role of Italian research. *Third International Congress of Salicaceae in Argentina*, 2011, p. 9.

5. Korlykhanov M. S., Korlykhanova T. V. The dust-retaining ability of the leaf surface of the Sverdlovsk silver pyramidal poplar in Yekaterinburg. *Agrarnyy vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals], 2008, no. 10 (52), pp. 93–94 (In Russian).

6. Dickmann D. I., Kuzovkina J. Poplars and willows in the world, with emphasis on silviculturally important species. Poplars and willows. *Trees for society and the environment*, 2014, vol. 22 (8), p. 91.

7. Sinchuk N. V., Kuchval'skaya A. B., Buga S. V. Damage to the leaf blades of *Populus × canadensis* by larvae of poplar moth (*Phyllonorycter populifoliella*) in the green stands of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus in 2016–2018. *Vestnik MDPU imya I. P. Shamyakina* [Bulletin of the MSPU named after I. P. Shamyakin], 2020, no. 2, pp. 58–65 (In Russian).

8. Sinchuk N. V., Kurchenko V. P. Resistance of various poplar species (*Populus* spp.) to diseases and a complex of pests. *Ekobiotech* [Ecobiotech], 2021, vol. 4, no. 3, pp. 210–220 (In Russian).

9. Semenchenko V. P. Alien animal species in natural ecosystems of Belarus. *Nauka i innovatsii* [Science and Innovation], 2018, vol. 7, no. 185, pp. 20–25 (In Russian).

10. Skvortsov A. K. A systematic synopsis of the genus *Populus* in Eastern Europe, Northern and Central Asia. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada* [Bulletin of the Main Botanical Garden], 2010, issue 196, pp. 62–73 (In Russian).

11. *Populus × berolinensis*'. Available at: <https://treesandshrubsonline.org/articles/populus/populus-x-berolinensis/> (accessed 20.10.2022).

12. Fedoruk A. T. *Introdutsirovannyye derev'ya i kustarniki zapadnoy chasti Belorussii* [Introduced trees and shrubs of the western part of Belarus]. Minsk, Izdatel'stvo BGU imeni V. I. Lenina Publ., 1972. 191 p. (In Russian).

13. Valyagina-Matyulina E. T. *Derev'ya i kustarniki sredney polosy evropeyskoy chasti Rossii: Illyustrirovannyy opredelitel'* [Trees and shrubs of the middle zone of the European part of Russia: Illustrated determinant]. Moscow, Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK Publ., 2012. 459 p. (In Russian).

14. Kirichenko N. I. Methodological approaches to the study of insects mining the leaves of woody plants. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy], 2014, no. 207, pp. 235–246 (In Russian).

15. Ellis W. N. *Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833). Available at: <https://bladmineerders.nl/parasites/animalia/arthropoda/insecta/lepidoptera/ditrysia/gracillarioidea/gracillariidae/lithocolletinae/phyllonorycter/phyllonorycter-populifoliella/> (accessed 30.09.2022).

16. Doorendeerd C., van Haren M. M., Schermer M., Pieterse S., van Nieuwerkerken E. J. A Linnaeus NG interactive key to the Lithocolletinae of North-West Europe aimed at accelerating the accumulation of reliable biodiversity data (Lepidoptera, Gracillariidae). Available at: https://lithocolletinae.linnaeus.naturalis.nl/linnaeus_ng/app/views/matrixkey/index.php?epi=9 (accessed 30.09.2022).

17. Nel J., Varenne T. Atlas des Lépidoptères Gracillariidae Lithocolletinae de France. *Revue Association Roussillonaise d'Entomologie (R.A.R.E.)*, 2014, vol. 23 Supplement, pp. 1–144.

18. Sinchuk O. V., Roginsky A. S., Danilenok V. V., Goncharov D. A., Treshcheva A. B. *Kolichestvennaya otsenka povrezhdennosti invazivnymi miniruyushchimi nasekomymi listovykh plastinok dekorativnykh drevesnykh rasteniy* [Quantitative assessment of the damage caused by invasive mining insects to the leaf blades of ornamental woody plants] Minsk, BGU Publ., 2016. 30 p. (In Russian).

19. Mastitskiy S. E., Shitikov V. K. *Statisticheskii analiz i vizualizatsiya dannykh s pomoshch'yu R.* [Statistical analysis and visualization of data with the help of R]. Moscow, DMK Press Publ., 2015. 496 p. (In Russian).

Информация об авторах

Синчук Надежда Владимировна – аспирант кафедры зоологии. Белорусский государственный университет (220030 г. Минск, пр. Независимости, 4, Республика Беларусь). E-mail: n.v.sinchuk@gmail.com

Буга Сергей Владимирович – доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой зоологии. Белорусский государственный университет (220030, г. Минск, пр. Независимости, 4, Республика Беларусь). E-mail: sergey.buga@gmail.com

Information about the authors

Sinchuk Nadzeya – PhD student, the Department of Zoology. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: n.v.sinchuk@gmail.com

Buga Sergey – DSc (Biology), Professor, Head of the Department of Zoology. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sergey.buga@gmail.com

Поступила 15.03.2023

ТУРИЗМ И ЛЕСОХОТНИЧЬЕ ХОЗЯЙСТВО

TOURISM AND FOREST HUNTING

УДК 338.48-6:37

В. Л. Андреева

Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПОНЯТИЯ «ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ТУРИЗМ»

С середины XX века индустрия туризма как составная часть третичного и четвертичного секторов мирового хозяйства занимает ведущую позицию. Как известно, он наряду с природно-ресурсным, трудовым, производственным, инфраструктурным потенциалами слагает комплексный потенциал территории. Одним из перспективных направлений развития современного туризма является образовательный туризм. Сфера его изучения характеризуется дуализмом и напрямую связана как с осуществлением туристической деятельности, так и с получением образовательных услуг.

В статье рассматриваются теоретические аспекты образовательного туризма, приведен его исторический анализ развития от античности до современности. Анализируются отличительные черты образовательного туризма. Приводится дифференциация туров по масштабу, продолжительности, способу организации, числу участников, времени возрасту потребителей образовательного продукта, полученным навыкам, формам образования и особенностям образовательной среды. Отличительными особенностями развития современного общества являются общая глобализация и цифровизация. Последние определили активный рост, развитие и распространение цифровых технологий по всему миру. По этой причине в качестве отдельного вопроса рассматриваются дополненная и виртуальная реальности, используемые при организации образовательного туризма. Характеризуются виртуальные и реальные объекты, приводятся основные требования к их отбору в качестве объектов туризма.

Ключевые слова: туризм, образование, образовательный туризм, виды образовательного туризма, особенности образовательного туризма, мотивация к образовательным турам, виртуальный туризм.

Для цитирования: Андреева В. Л. Аналитический обзор понятия «образовательный туризм» // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 110–119. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-13.

V. L. Andreeva

Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank

ANALYTICAL REVIEW OF THE CONCEPT OF “EDUCATIONAL TOURISM”

Since the middle of the XX century, the tourism industry as an integral part of the tertiary and quaternary sectors of the world economy has occupied a leading position. As you know, it, along with natural resource, labor, production, and infrastructure potentials, makes up the complex potential of the territory. One of the promising areas of development of modern tourism is educational tourism. The scope of its study is characterized by dualism, and is directly related to both the implementation of tourism activities and the receipt of educational services.

The article examines the theoretical aspects of educational tourism, provides its historical analysis of development from antiquity to the present. The distinctive features of educational tourism are analyzed. The differentiation of tours by scale, duration, method of organization, number of participants, time, age of consumers of the educational product, acquired skills, forms of education and features of the educational environment is given. The distinctive features of the development of modern society are the general globalization and digitalization. The latter have determined the active growth, development and spread of the development of digital technologies around the world. For this reason, augmented and virtual realities used in the organization of educational tourism are considered as a separate issue. The article characterizes virtual and real objects, provides the basic requirements for their selection as tourism objects.

Keywords: tourism, education, educational tourism, types of educational tourism, features of educational tourism, motivation for educational tours, virtual tourism.

For citation: Andreeva V. L. Analytical review of the concept of “educational tourism”. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 110–119 (In Russian). DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-13.

Введение. Одним из направлений современного туризма является динамически развивающийся образовательный туризм.

История развития образовательного туризма уходит своими корнями в античный период, во времена господства Римской империи, когда состоятельные и знатные граждане республики отправляли своих сыновей для получения образования в Древнюю Элладу. Позднее, в эпоху Возрождения, открытие первых университетов и развитие идей гуманизма и антропоцентризма способствовало привлечению молодых образованных людей в европейские страны. Туристические поездки представителей аристократии и буржуа с образовательной целью в Европу и позже в США стали популярными в конце XIX века в связи с развитием средств и способов коммуникации, организации в крупных городах Европы международных торгово-промышленных выставок [1]. Общая глобализация и информативность образования со второй половины XX века способствовали развитию образовательных и социокультурных международных обменов, в том числе получила развитие академическая мобильность преподавателей и студентов, которая распространилась на все возрастные группы населения [2]. В дальнейшем активное развитие информационных технологий способствовало появлению виртуальной и дополненной реальности в сфере образования и туризма [3–5], а пандемия COVID-19 обусловила развитие внутреннего туризма, в том числе на территории Республики Беларусь [6]. Следовательно, в современном мире исторически обусловленное развитие образовательного туризма имеет важное и перспективное значение для формирования и развития личностных, коммуникативных и профессиональных компетенций.

Основная часть. Образовательный туризм включает в себя две компоненты – туризм и образование, которые в целом и определяют его суть. С одной стороны, это туристическое путешествие, а с другой – обучение и воспитание всесторонне развитой личности, удовлетворение ее образовательных потребностей и интересов, совокупность приобретенных знаний, умений, навыков и компетенций в интересах самой личности, а также общества и государства [7, 8].

Впервые в научной литературе понятие «образовательное путешествие» встречается у

D. Bodger [9]. Образовательный туризм неразрывно связан с экотуризмом, туризмом всемирного наследия, агротуризмом, академическими студенческими обходами [9] и описывается как запланированное туристическое мероприятие участников группы, основной целью которой является получение опыта, напрямую связанного с образовательной функцией места пребывания.

Основными компонентами образовательного туризма являются образование, досуг и туристическая деятельность [10]. Образовательный тур не предусматривает осуществления оплачиваемой деятельности туристами на территории временного пребывания даже в их свободное время [11], однако предполагает финансовые вложения в местную инфраструктуру [12].

По мнению авторов публикации [13], различные социальные и возрастные группы туристов имеют, как правило, разную туристическую мотивацию. Так, например, образовательную экскурсию для школьников учителя определяют как образовательную, а сами учащиеся могут ее воспринимать как приключение.

Образовательный ресурс отличается своей уникальностью [13, 14]. Одни его видят в тесной взаимосвязи между полученным опытом туристов и территориальной принадлежностью объектов туризма, другие говорят о неформальности окружающей обстановки при проведении тура [15–17].

Многие авторы подтверждают необходимость изучения местных специфических особенностей субъектами образовательного туризма [12, 18]. А. С. Обухов и Д. И. Савельева предлагают проводить полную детализацию территориального пребывания, суть которого в пространственном и геохронологическом изучении особенностей природных и культурных ландшафтов, их компонентов, явлений и процессов [19], при этом А. В. Фирсова и С. Э. Мышлявцева указывают на возможность изучения объектов образовательного туризма в естественных условиях [20].

В отдельную категорию выделяют городской образовательный туризм, подчеркивая его многофункциональный характер. Турист в городской среде может рассматривать целый ряд культурных, исторических, образовательных, спортивных, развлекательных и других объектов [17].

Образовательное путешествие представляет собой временный выезд с постоянного места жительства [11]. Если форма мероприятия дистанционная, то граждане разных стран, находящиеся в местах своего основного проживания, являются участниками образовательного тура, поскольку в результате получают образовательный продукт [21].

Вопрос о продолжительности образовательного тура в настоящее время остается открытым. Одни исследователи отводят на курсы повышения квалификации или углубления знаний по определенным дисциплинам временной промежуток от 15 дней до 3 месяцев [22], другие – от 24 ч до 6 месяцев [23], третьи говорят о том, что данная поездка должна длиться более 24 ч и иметь хотя бы одну ночевку за пределами территории постоянного проживания [24]. Иногда время поездки может быть изменено до 12 месяцев в связи с продолжительностью образовательных курсов или более 12 месяцев по причине обучения в рамках академической мобильности [25].

Если турист участвует в образовательной деятельности на время менее 24 ч без ночевки, то она относится к категории образовательной экскурсии [24].

Одним из основополагающих условий образовательного путешествия является удовлетворение образовательных потребностей – от общего познавательного интереса [24, 26, 27] до целенаправленного педагогического процесса организации учебно-познавательной деятельности и путешествия, ориентированного на приобретение новых знаний и навыков разного уровня или улучшение имеющихся [23, 28, 29], а также формирование академических универсальных, профессиональных и специализированных компетенций [26], личностный рост, самосовершенствование и саморазвитие [12, 30].

Образовательный туризм способствует получению знаний путем взаимосвязи теории и активной практики [31–33], при этом, как указывает А. С. Обухов, сформированные компетенции будут индивидуальными, связанными с мотивацией, интересами и предыдущим опытом [34], а также будет осуществляться связь обучения и личностного роста [35].

Объем получаемых компетенций, продолжительность и интенсивность образовательного процесса определяются задачами обучения [24]. Качество получаемого туристского продукта подтверждается сертификатами и дипломами и контролируется структурированными образовательными программами учреждений образования, в том числе программами академической мобильности [31, 36, 37].

Разнообразие видов деятельности образовательного туризма требует их классификации.

Т. В. Пономарева, рассматривая образовательный туризм с точки зрения потребления материальных благ, услуг и товаров, связывает его со следующими составляющими: экономической (основан на работе с образовательным продуктом), деятельностной (связан с основными видами деятельности), потребностно-ориентированной (основан на удовлетворении любознательности), программно-ориентированной (определяется задачами учебных программ образовательных учреждений). Она выделяет также комбинированную составляющую – сочетание целевых ориентиров и подходов [38].

С точки зрения дестанации, места проведения и направления образовательный туризм может быть внутренним (национальный, региональный, межрегиональный) и внешним (въездной и выездной международной) [24, 39–42].

По способу организации различают самостоятельный и организованный образовательный туризм [41].

По возрасту и категории участников образовательного тура выделяют дошкольный, школьный, студенческий, молодежный, профессиональный туризм [41].

По числу участников – индивидуальный, групповой и массовый туризм [41].

По полученным навыкам образовательные туры чаще дифференцируют на три вида: изучение иностранных языков, обучение различным видам спорта, профессиональное обучение [36]. Ш. Тейлор по мотиву, деятельности и контексту туров выделяет языковое обучение, академический обмен и углубленные научные или культурно-научные туры [43].

Различают реальную и виртуальные среды образовательного туризма, причем форма занятий может быть как очная и заочная, так и дистанционная.

В период пандемии COVID-19 широко масштабное развитие получила виртуальная академическая мобильность. Например, на факультете естествознания в Белорусском государственном педагогическом университете имени М. Танка в 2021–2022 гг. проходили дистанционную академическую мобильность и стажировку студенты и магистранты из Республики Казахстан. Все виды занятий по учебным предметам – лекции, лабораторные и практические, в том числе экзамены и зачеты, проходили в дистанционной форме, использовалась образовательная платформа Moodle.

Виртуальные экскурсии в образовании получили широкое применение. В настоящее время различают несколько вариантов создания

виртуальных экскурсий. Например, в виде презентаций, большинство которых разрабатывались в Microsoft PowerPoint, Keynote или Google Slides.

Использование цифровизации в сфере туризма дало возможность расширить не только пакет услуг (онлайн-бронирование билетов на различные мероприятия, заказ экскурсий, транспорта и мест проживания), но и позволило создать и использовать реальное трехмерное поликомпонентное пространство с помощью 3D-видеопанорам, где используются ГИС-навигации. Так, на основе множества цифровых фотографий, сделанных с разных ракурсов и собранных в единое целое, выполняется переход от одного объекта единого пространства к другому.

Различают виртуальные образовательные путешествия с дополненной (AR), виртуальной (VR) и смешанной (MR) реальностями. Первый вариант представляет собой использование технологии наложения различной информации (звука, изображения, текста) на объективную реальность, второй – создание искусственной виртуальной среды, а третий сочетает элементы двух сред.

Изображение дополненной реальности проектируется с помощью специализированных платформ, в частности Unity3D, Vuforia, AR Foundation. Визуализация объектов выполняется с помощью специальных программ, изначально разработанных для дизайна интерьера, среди них выделяют 3D Buidier, Blender, Sketch Up.

Внедрение облачных технологий в образовательный контент позволяет увеличить емкость носителей информации, их сохранность, безопасность, дает возможность работать с графическими редакторами и виртуальными носителями [44].

Примером технологии дополненной реальности может служить составление каталога наиболее распространенных древесных растений в национальном парке Малайзии. С помощью AR-изображений, проецируемых на смартфон, определяется вид, отображается подробное ботаническое описание с указанием использования в хозяйстве [45]. Применение данного приложения с геолокационной привязкой позволит в дальнейшем изучить ареалы распространения видов с последующим созданием карт. Подобные приложения достаточно широко представлены в Google Play, например определитель птиц Ptushki.

С помощью виртуальных технологий можно реконструировать образы историко-культурных объектов по анализу редких архивных фотографий и бумажных документов [45, 46], а также воссоздавать рельеф территории [47].

Совершенствование цифровых технологий способствует появлению новых возможностей виртуальных путешествий с помощью VR-очков, специальных перчаток, шлемов со встроенными мониторами, трекинговых систем, НМД-устройств. Навигация таких образовательных туров отличается наглядностью и доступностью, включает элементы инфографики, имеет различные уровни и способы детализации пространства (аудиозаписи, видеоматериалы). Приложения виртуальной реальности позволяют предварительно изучить территорию, которую планируется посетить, создать мотивацию к обучению или эмоционально обновить полученный ранее опыт.

Отметим еще одну особенность цифровой среды – ее способность к взаимодействию и объединению в группы разных социальных и возрастных слоев населения на период организации путешествия [48].

Туристские виртуальные объекты характеризуются полифункциональностью, интерактивностью, безопасностью, надежностью, комфортностью, при этом пользователь самостоятельно определяет объект наблюдений и управляет им [49, 50].

Объекты образовательного туризма с точки зрения временной компоненты могут относиться к разным временным категориям – древним (историческим), современным или перспективным.

Ресурсами образовательного туризма является реальная действительность – объекты, явления и процессы естественной природой среды и антропогенные – производственные, социокультурные, историко-культурные, научные, образовательные, производственные, инфраструктурные объекты [51].

Все разнообразие ресурсов можно представить следующими основными группами [37, 52–57]:

- 1) природные объекты: отдельные компоненты и ландшафтные комплексы, особо охраняемые природные территории, экологические тропы;
- 2) природно-антропогенные объекты: лесопарки, водохранилища, зоопарки, зоосады, оранжереи, ботанические парки;
- 3) историко-культурные объекты (*археологические памятники*: стоянки древнего человека, курганы, городища и т. п.; *мемориальные памятники*: военно-оборонительные сооружения, места захоронений, дома-музеи и т. п.; *памятники и объекты архитектуры и культурного наследия*: архитектурные ансамбли и комплексы, исторические центры, музеи, центры народных промыслов и ремесел,

декоративно-прикладного творчества и т. п.; *объекты архивов*: исторические рукописные документы, редкие книги; *объекты промышленности*: предприятия, цеха, транспортные узлы и т. п.);

4) культурные (театры, выставки) и культурно-спортивные (спортивные комплексы, стадионы, спортивные залы) объекты;

5) образовательные объекты (университеты, просветительские центры, центры занятости, повышения квалификации, музеи, базы учебных практик);

6) рекреационные, лечебные и лечебно-профилактические объекты (*рекреационные и лечебно-профилактические*: курорты, базы отдыха, санатории, центры реабилитации и т. д.; *санитарно-эпидемиологические* – центры гигиенического образования, *аптечные* – лаборатории).

Основными требованиями к отбору объектов образовательного туризма являются их потенциальная емкость, выраженная в способности удовлетворять познавательные потребности в течение длительного периода времени [58], интенсификация форм и методов обучения, направленная на повышение качества обучения при условии

уменьшения затрат времени [59], устойчивость объектов туризма к нагрузкам и эстетическая привлекательность (аттрактивность) [60].

Ориентированность на потребителя, наличие соответствующих объектов, в которых может быть реализован туристский продукт, взаимодействия с окружающей средой и социумом, определение и соблюдение временных рамок для реализации образовательных туров, выполнение педагогических задач по формированию и развитию соответствующих компетенций, по мнению А. Г. Гусейновой, является основой для развития данной категории туризма [40].

Заключение. Образовательный туризм является одним из перспективных направлений развития современного туризма. Ему свойственен дуализм, выражающийся в получении знаний и рекреации в определенный временной промежуток. Диапазон туристов достаточно широк, однако большая доля приходится на экономически активную часть населения. Основным условием образовательного тура является удовлетворение образовательных потребностей, регламентируемых образовательными программами учреждений образования.

Список литературы

1. Шульгина О. В., Шульгина Д. П. Развитие туризма в России на рубеже XIX–XX веков // Исторический журнал: научные исследования. 2018. № 3. С. 95–110.
2. Шумейко Т. С., Баубекова Г. К. Образовательный туризм как педагогическая инновация в условиях виртуальной среды // Вестник Карагандинского университета. Сер. Педагогика. 2021. № 2 (102). С. 7–17.
3. Шамликашвили В. А. Виртуальный туризм как новый вид туризма // Креативная экономика. 2014. № 10 (94). С. 128–138.
4. Плотникова В. С. Образовательные возможности виртуального туризма // Сервис в России и за рубежом. 2021. Вып. 15. № 2 (94). С. 45–56. DOI: 10.24412/1995-042X-2021-2-45-56.
5. Verkerk V. A. Virtual reality tourism: the new frontier or the end of the journey? Pretoria, 2021. 383 p.
6. Габидуллина Э. В. Современное состояние и подходы к развитию туристической отрасли в регионе // Междунар. науч.-исслед. журн. 2023. № 1 (127). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoe-sostoyanie-i-podhody-k-razvitiyu-turisticheskoy-otrasli-v-regione> (дата обращения: 10.03.2023).
7. Об изменениях Кодекса об образовании: Закон Респ. Беларусь, 14.01.2022, № 154-3 // Pravo.by. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=H12200154&p1=1&p5=0> (дата обращения: 10.03.2023).
8. О туризме: Закон Респ. Беларусь, 01.01.2023, № 523 // Респ. союз турист. орг. URL: <https://www.toursoyuz.by/2021/11/18/zakon-o-turizme> (дата обращения: 10.03.2023).
9. Bodger D. Leisure, learning, and travel // Journal of Physical Education, Recreation & Dance. 1998. Vol. 69, no. 4. P. 28–31. DOI: 10.1080/07303084.1998.10605533.
10. Huang R. Mapping Educational Tourists: Experience in the UK // Understanding International Students. Third World Q. 2008. No. 29. P. 1003–1020.
11. Козлова Н. А. Проблемы применения терминологии в индустрии международного образовательного туризма // *п-Economy*. 2008. № 4 (61). С. 289–294.
12. Судороженко А. В. Функции и роль образовательного туризма // Вестн. ун-та. 2013. № 16. С. 94–98.
13. McGladdery C. A., Lubbe B. A. Rethinking educational tourism: Proposing a new model and future directions // Tourism Review. 2017. Vol. 72, no. 3. P. 319–329. DOI: 10.1108/TR-03-2017-0055.
14. Matoga L. The Erasmus Programme in the development of educational tourism in Europe // The 3rd Electronic International Interdisciplinary Conference. 2014. No. 1 // Edu-tourism. URL: <https://www.edutur.org/edu/chto-takoe-educational-tourism> (date of access: 05.01.2023).

15. Wilkinson S., Badwan K. Walk this way: The rhythmic mobilities of university students in greater Manchester, UK // *Mobilities*. Taylor & Francis Journals. 2021. Vol. 16 (3). P. 373–387. DOI: 10.1080/17450101.2020.1833565.
16. Iranmanesh S. A. Mousavi Insights from the relationship between urban form, social media, and education // *Current issues in tourism*. 2022. DOI: 10.1080/13683500.2022.2090908.
17. Antić M. Development of urban tourism within the urbanization and globalization framework // *Bulletin of the serbian geographical society*. 2020. No. 100 (2). P. 83–106. DOI:10.2298/GSGD2002083A.
18. Alipour H., Fatemi H., Malazizi N. Is Edu-Tourism a Sustainable Option? A Case Study of Residents' Perceptions. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, no. 15. P. 1–29. DOI: 10.3390/su12155937.
19. Обухов А. С., Савельева Д. И. Город открытий. Методология образовательного туризма в мегаполисе // *Исследователь/Researcher*. 2019. № 4 (28). С. 12–47.
20. Фирсова А. В., Мышлявцева С. Э. Образовательный туризм в Пермском крае: учеб.-метод. пособие. Пермь, 2014. 149 с.
21. Ковалев А. М., Липка В. М., Рапацкий Ю. Л. Изучение объектов культурного наследия с помощью виртуальных музеев как эффективного инструмента современной музейной педагогики // *Современ. пед. образование*. 2023. № 2. С. 24–27.
22. Борисова Н. В. Образовательный туризм как средство мотивации школьников к изучению географии // *Вест. магистратуры*. 2018. № 9–2 (84). С. 34–36.
23. Лунин Э. А. Совершенствование управления образовательным туризмом в РФ: автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05. СПб., 2009. 23 с.
24. Ritchie B. W., Carr N., Cooper C. *Managing Educational Tourism (Aspects of Tourism)* // Bristol: Channel View-Publications. 2003. Vol. 10. P. 63–70. DOI: 10.21832/9781873150528.
25. Мамраева Д. Г., Ташенова Л. В. Образовательный туризм в Казахстане: современное состояние и особенности развития // *Вест. Рос. междунар. акад. туризма*. 2019. № 3. С. 119–130.
26. Зорин А. И. Рекреационное проектирование в системе педагогики туризма // *Вест. Рос. междунар. акад. туризма*. 2022. № 3. С. 38–42.
27. Edutourism Augmented Reality Mobile Application for Forest Conservation / Ariffin N. H. M [et al.] // *Proceedings of ICRES 2022: International Conference on Research in Education and Science, Antalya, 24–27 March 2022, Antalya, 2022*. P. 207–219.
28. Gibson H. The Educational Tourist // *Journal of Physical Education Recreation and Dance*. 1998. Vol. 69. P. 32–34.
29. Choong N. S., Onn Y. Effects of implementation intentions on educational tourism: a protection motivation theory approach // *Journal of Teaching in Travel & Tourism*. 2021. Vol. 22, no. 2. P. 163–178. DOI: 22.10.1080/15313220.2021.1950102.
30. Рассоха Ю. А., Егорова Е. Н. Современное состояние образовательного туризма на рынке туристических услуг // *Colloquium-journal*. 2019. № 8 (32). С. 78–80. DOI: 10.24411/2520-6990-2019-10204.
31. Pitman T., Broomhall S., Majocha E. Teaching Ethics beyond the Academy: Educational Tourism, Lifelong Learning and Phronesis // *Stud. Educ. Adults*. 2011. No. 43. P. 4–17.
32. Осокина И. В. Образовательный туризм как образовательная технология // *Технологии в сферах туризма, сервиса и дизайна: проблемы и инновационные решения: Гуманитарные технологии в современном мире: материалы междунар. науч.-практич. конф., Калининград, 17–19 мая 2018 г. Калининград, 2018*. С. 243–245.
33. Александрова А. Ю. Образование и туризм: аспекты взаимодействия // *Горизонты гуманитарного знания*. 2016. № 1. С. 35–45.
34. Обухов А. С. Развитие исследовательской деятельности учащихся. М.: Нац. книжный центр, 2015. 250 с.
35. Holdnak A., Holland S. M. Edu-Tourism: Vacationing to Learn // *Parks and Recreation*. 1996. Vol. 31, no. 9. P. 72–75.
36. Воскресенский В. Ю. *Международный туризм*. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2006. 232 с.
37. Соломин В. П., Погодина В. Л. Современное состояние и перспективы развития образовательного туризма в России // *Изв. Рос. гос. пед. ун-та им. А. И. Герцена*. 2007. Вып. 8, № 30. С. 96–112.
38. Пономарева Т. В. Образовательный туризм: сущность, цели и основные сегменты потребителей // *Проблемы современной экономики: материалы IV Междунар. науч. конф., Челябинск, февраль 2015 г. Челябинск, 2015*. С. 139–143.
39. Гельман В. Я. Состояние и перспективы развития образовательного туризма // *Вест. Нац. акад. туризма*. 2009. № 1 (9). С. 48–52.

40. Гусейнова А. Г. Сущность понятия «образовательный туризм» и его основные понятия // Вест. ассоц. вузов туризма и сервиса. 2015. Т. 9, № 4. С. 64–69.
41. Малявин С. Н., Федорова К. А. Индивидуальное образовательное путешествие как содержательная основа педагогических технологий // Изв. Рос. гос. пед. ун-та им. А. И. Герцена. 2021. № 201. С. 133–141.
42. Авагян А. А. Образовательный туризм в России: современное состояние и перспективы развития // Сервис plus. 2019. Т. 13, № 3. С. 21–30.
43. Селиванова С. И. Образовательный туризм // Вест. ун-та. 2014. № 11. С. 169–174.
44. Аскерова Т. А. Основные преимущества применения облачных технологий в системе работы образовательного учреждения // Инновационная наука. 2022. № 7–1. С. 10–12.
45. Dyulicheva Y. Y., Malakhatko D. G., Mladenović R. The augmented reality usage for learning of Disappearing historical monuments // Гласник Српског географског друштва (Bulletin of the Serbian geographical society). 2022. No. 102 (1). P. 131–140. DOI: 10.2298/GSGD2201131D.
46. Лысенко К. Д. Опыт применения 3D-реконструкций объектов культурного наследия в музейной практике (на примере Троицкого собора в Ставрополе-на-Волге) // Историческая информатика. 2022. № 2 (40). С. 181–195.
47. Энтин А. Л. Виртуальная реконструкция исторической поверхности рельефа восточной части белого города Москвы с использованием программных средств ГИС // Историческая информатика. 2020. № 4 (34). С. 179–191.
48. Оборин М. С. Цифровая трансформация туристического пространства: новые возможности // Современные проблемы сервиса и туризма. 2022. Вып. 16, № 1. С. 157–164. DOI: 10.24412/1995-0411-2022-1-157-164.
49. Алексеева Н. Д., Меркулова С. В., Горяинова Ж. Н. Инновационная образовательная экскурсия как форма развития внутреннего туризма Самарской области // Вест. Поволж. гос. ун-та сервиса. Серия: Экономика. 2019. № 1 (55). С. 90–100.
50. Межевникова О. П., Ухина Т. В. Виртуальный туризм: за и против // Сервис в России и за рубежом. 2020. Т. 14, № 3 (90). С. 6–14.
51. Гайворон Т. Д., Майнашева Г. М. Ресурсы образовательного туризма особо охраняемых природных территорий Москвы // Вест. МГПУ. Сер. Естественные науки. 2019. № 4 (36). С. 47–54.
52. Ресурсы образовательного туризма российских регионов: Центральная Россия: монография / О. В. Шульгина и [др.]. М.: МГПУ, 2016. 252 с.
53. Колотова Е. В. Рекреационное ресурсоведение. М.: РМАТ, 1999. 135 с.
54. Donohoe M., Needham R. D. Ecotourism: The evolving contemporary definition // Journal of Ecotourism. 2006. No. 3. P. 192–210. DOI: 10.2167/joe152.0.
55. Tey J. A., Chandrashekar R. Analysis of edu-tourism factors among students in public universities in Johor // Research in Management of Technology and Business. 2021. Vol. 2, no. 2. P. 241–254. DOI: 10.30880/rmtb.2021.02.02.019.
56. Соловьев А. П. Образовательный туризм и культурное наследие: пути взаимодействия в Российской Федерации // Журнал Института Наследия. 2016. № 1 (4). С. 5.
57. Крум Э. В. Развитие модели экспортно-ориентированного рынка образовательных услуг // Вест. Белорус. гос. экон. ун-та. 2012. № 5. С. 13–20.
58. Дудина И. А. Характеристика емкости мегарегиональных рынков академического образования // Экономика. Информатика. 2009. Вып. 11–1, № 9 (64). С. 48–56.
59. Завада Г. В. Подходы к повышению информационно-операционной емкости обучения в вузе // Вест. Казан. гос. энергет. ун-та. 2016. № 1 (29). С. 116–121.
60. Андреева В. Л. Оценка аттрактивности ресурсов учебно-экологических троп // Труды БГТУ. Сер. 1: Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2022. № 2 (258). С. 94–104.

References

1. Shulgina O. V., Shulgina D. P. Development of tourism in Russia at the turn of the XIX–XX centuries. *Istoricheskiy zhurnal: nauchnyye issledovaniya* [Historical Journal: scientific research], 2018, no. 3, pp. 95–110 (In Russian).
2. Shumejko T. S., Baubekova G. K. Educational tourism as a pedagogical innovation in a virtual environment. *Vestnik Karagandinskogo universiteta* [Bulletin of Karaganda University]. Ser. Pedagogy, 2021, no. 2 (102), pp. 7–17 (In Russian).
3. Shamlikashvili V. A. Virtual tourism as a new type of tourism. *Kreativnaya ekonomika* [Creative Economy], 2014, no. 10 (94), pp. 128–138 (In Russian).

4. Plotnikova V. S. Educational opportunities of virtual tourism. *Servis v Rossii i za rubezhom* [Service in Russia and abroad], 2021, issue 15, no. 2 (94), pp. 45–56. DOI: 10.24412/1995-042X-2021-2-45-56 (In Russian).
5. Verkerk V. A. Virtual reality tourism: the new frontier or the end of the journey? Pretoria, 2021. 383 p.
6. Gabidullina E. V. The current state and approaches to the development of the tourism industry in the region. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2023, no. 1 (127). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoe-sostoyanie-i-podhody-k-razvitiyu-turisticheskoy-otrasli-v-regione> (accessed 10.02.2023) (In Russian).
7. On Amendments to the Education Code: The Law of the Republic of Belarus, 14.01.2022, no. 154-Z. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=H12200154&p1=1&p5=0> (In Russian).
8. About Tourism: the Law of the Republic of Belarus, 01.01.2023, no. 523. Available at: <https://www.toursoyuz.by/2021/11/18/zakon-o-turizme> (accessed 08.02.2023) (In Russian).
9. Bodger D. Leisure, learning, and travel. *Journal of Physical Education, Recreation & Dance*, 1998, vol. 69, no. 4, pp. 28–31. DOI: 10.1080/07303084.1998.10605533.
10. Huang R. Mapping Educational Tourists: Experience in the UK. *Understanding International Students. Third World Q*, 2008, no. 29, pp. 1003–1020.
11. Kozlova N. A. Problems of terminology application in the international educational tourism industry. *π-Economy*, 2008, no. 4 (61), pp. 289–294 (In Russian).
12. Sudorozhenko A. V. Functions and role of educational tourism. *Vestnik universiteta* [Bulletin of the University], 2013, no. 16, pp. 94–98 (In Russian).
13. McGladdery C. A., Lubbe B. A. Rethinking educational tourism: Proposing a new model and future directions. *Tourism Review*, 2017, vol. 72, no. 3, pp. 319–329. DOI: 10.1108/TR-03-2017-0055.
14. Matoga L. The Erasmus Programme in the development of educational tourism in Europe. *The 3rd Electronic International Interdisciplinary Conference*, 2014, no. 1. Available at: <https://www.edutur.org/edu/chto-takoe-educational-tourism> (accessed 05.01.2023).
15. Wilkinson S., Badwan K. Walk this way: The rhythmic mobilities of university students in greater Manchester, UK. *Mobilities. Taylor & Francis Journals*, 2021. vol. 16 (3), pp. 373–387. DOI: 10.1080/17450101.2020.1833565.
16. Iranmanesh S. A. Mousavi Insights from the relationship between urban form, social media, and edu-tourism. *Current issues in tourism*, 2022. DOI: 10.1080/13683500.2022.2090908.
17. Antić M. Development of urban tourism within the urbanization and globalization framework. *Bulletin of the serbian geographical society*, 2020, no. 100 (2), pp. 83–106. DOI: 10.2298/GSGD2002083A.
18. Alipour H., Fatemi H., Malazizi N. Is Edu-Tourism a Sustainable Option? *A Case Study of Residents' Perceptions. Sustainability*, 2020, vol. 12, no. 15, pp. 1–29. DOI: 10.3390/su12155937.
19. Obuhov A. S., Saveleva D. I. The city of discoveries. Methodology of educational tourism in the megapolis. *Issledovatel'* [Researcher], 2019, no. 4 (28), pp. 12–47 (In Russian).
20. Firsova A. V., Myshljavceva S. E. *Obrazovatel'nyy turizm v Permskom kraje* [Educational tourism in the Perm Region]. Perm, 2014. 149 p. (In Russian).
21. Kovalev A. M., Lipka V. M., Rapackij Ju. L. The study of cultural heritage objects with the help of virtual museums as an effective tool of modern museum pedagogy. *Sovremennoye pedagogicheskoye obrazovaniye* [Modern pedagogical education], 2023, no. 2, pp. 24–27 (In Russian).
22. Borisova N. V. Educational tourism as a means of motivating schoolchildren to study geography. *Vestnik magistratury* [Bulletin of Magistracy], 2018, no. 9-2 (84), pp. 34–36 (In Russian).
23. Lunin E. A. *Sovershenstvovaniye upravleniya obrazovatel'nyim turizmom v RF. Avtoreferat dissertatsii kandidata ekonomicheskikh nauk* [Improving the management of educational tourism in the Russian Federation. Abstract of thesis PhD (Economics)]. St. Peterburg, 2009. 23 p. (In Russian).
24. Ritche B. W., Carr N., Cooper C. Managing Educational Tourism (Aspects of Tourism). *Bristol: Channel View-Publications*, 2003, vol. 10, pp. 63–70. DOI 10.21832/9781873150528.
25. Mamraeva D. G., Tashenova L. V. Educational tourism in Kazakhstan: current state and features of development. *Vestnik Rossiyskoy mezhdunarodnoy akademii turizma* [Bulletin of the Russian International Academy of Tourism], 2019, no. 3, pp. 119–130 (In Russian).
26. Zorin A. I. Recreational design in the system of tourism pedagogy. *Vestnik Rossiyskoy mezhdunarodnoy akademii turizma* [Bulletin of the Russian International Academy of Tourism], 2022, no. 3, pp. 38–42 (In Russian).
27. Ariffin N. H. M., Mazlin I., Zakaria M. Z., Yusoff F. H., Nasrudin Z. A. Edutourism Augmented Reality Mobile Application for Forest Conservation. *Proceedings of ICRES 2022: International Conference on Research in Education and Science*. Antalya, 2022, pp. 207–219.
28. Gibson H. The Educational Tourist. *Journal of Physical Education, Recreation and Dance*, 1998, vol. 69, pp. 32–34.

29. Choong N. S., Onn Y. Effects of implementation intentions on educational tourism: a protection motivation theory approach. *Journal of Teaching in Travel & Tourism*, 2021, vol. 22, no. 2, pp. 163–178. DOI: 22. 10.1080/15313220.2021.1950102.
30. Rassoha Ju. A., Egorova E. N. The current state of educational tourism in the market of tourist services. *Colloquium-journal*, 2019, no. 8 (32), pp. 78–80. DOI: 10.24411/2520-6990-2019-10204 (In Russian).
31. Pitman T., Broomhall S., Majocha E. Teaching Ethics beyond the Academy: Educational Tourism, Lifelong Learning and Phronesis. *Stud. Educ. Adults*, 2011, no. 43, pp. 4–17.
32. Osokina I. V. Educational tourism as an educational technology. *Tekhnologii v sferakh turizma, servisa i dizayna: problemy i innovatsionnyye resheniya. Gumanitarnyye tekhnologii v sovremennom mire: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Technologies in the fields of tourism, service and design: Problems and innovative solutions. Humanitarian technologies in the Modern World: materials of the international scientific and practical conference, Kaliningrad, 2018, pp. 243–245 (In Russian).
33. Aleksandrova A. Ju. Education and tourism: aspects of interaction. *Gorizonty gumanitarnogo znaniya* [Horizons of humanitarian knowledge], 2016, № 1, pp. 35–45 (In Russian).
34. Obuhov A. S. *Razvitiye issledovatel'skoy deyatel'nosti uchashchikhsya* [Development of research activities of students]. Moscow, Natsional'nyy knizhnyy tsentr Publ., 2015. 250 p. (In Russian).
35. Holdnak A., Holland S. M. Edu-Tourism: Vacationing to Learn. *Parks and Recreation*, 1996, vol. 31, no. 9, pp. 72–75.
36. Voskresenskiy V. Ju. *Mezhdunarodnyy turizm* [International tourism]. Moscow, YuNITI-DANA, 2006. 232 p. (In Russian).
37. Solomin V. P., Pogodina V. L. The current state and prospects of educational tourism development in Russia. *Izvestiya Rossiyskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta imeni A. I. Gertsena*. [Proceedings of the A. I. Herzen Russian State Pedagogical University], 2007, issue 8, no. 30, pp. 96–112 (In Russian).
38. Ponomareva T. V. Educational tourism: the essence, goals and main segments of consumers. *Problemy sovremennoy ekonomiki: materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Problems of modern economy: materials of the international scientific conference]. Cheljabinsk, 2015, pp. 139–143 (In Russian).
39. Gel'man V. Ja. State and prospects of educational tourism development. *Vestnik Natsional'noy akademii turizma* [Bulletin of the National Academy of Tourism], 2009, no. 1 (9), pp. 48–52 (In Russian).
40. Gusejnova A. G. The essence of the concept of “educational tourism” and its basic concepts. *Vestnik assotsiatsii vuzov turizma i servisa* [Bulletin of the Association of Universities of Tourism and Service], 2015, no. 4, issue 9, pp. 64–69 (In Russian).
41. Maljavin S. N., Fedorova K. A. Individual educational journey as a substantial basis of pedagogical technologies. *Izvestiya Rossiyskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta imeni A. I. Gertsena* [Proceedings of the A. I. Herzen Russian State Pedagogical University], 2021, no. 201, pp. 133–141 (In Russian).
42. Avagjan A. A. Educational tourism in Russia: current state and prospects of development. *Servis plus* [Service plus], 2019, no. 3, vol. 13, pp. 21–30 (In Russian).
43. Selivanova S. I. Educational tourism. *Vestnik universiteta* [Bulletin of the University], 2014, no. 11, pp. 169–174 (In Russian).
44. Askerova T. A. The main advantages of using cloud technologies in the system of an educational institution. *Innovatsionnaya nauka* [Innovative science], 2022, no. 7–1, pp. 10–12 (In Russian).
45. Dyulicheva Y. Y., Malakhatko D. G., Mladenović R. The augmented reality usage for learning of Disappearing historical monuments. *Glasnik Srpskog geografskog drustva* [Bulletin of the Serbian geographical society], 2022, no. 102 (1), pp. 131–140. DOI: 10.2298/GSGD2201131D (In Serbian).
46. Lysenko K. D. The experience of using 3D reconstructions of cultural heritage objects in museum practice (on the example of the Trinity Cathedral in Stavropol-on-Volga). *Istoricheskaya informatika* [Historical Informatics], 2022, no. 2 (40), pp. 181–195 (In Russian).
47. Eentin A. L. Virtual reconstruction of the historical relief surface of the eastern part of the white city of Moscow using GIS software. *Istoricheskaya informatika* [Historical Informatics], 2020, no. 4 (34), pp. 179–191 (In Russian).
48. Oborin M. S. Digital transformation of the tourist space: new opportunities. *Sovremennyye problemy servisa i turizma* [Modern problems of service and tourism], 2022, issue 16, no. 1, pp. 157–164. DOI: 10.24412/1995-0411-2022-1-157-164 (In Russian).
49. Alekseeva N. D., Merkulova S. V., Gorjainova Zh. N. Innovative educational excursion as a form of development of domestic tourism of the Samara region. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo*

universiteta servisa [Bulletin of the Volga State University of Service], series Economics, 2019, no. 1 (55), pp. 90–100 (In Russian).

50. Mezevnikova O. P., Uhina T. V. Virtual tourism: pros and cons. *Servis v Rossii i za rubezhom* [Service in Russia and abroad], 2020, vol. 14, no. 3 (90), pp. 6–14 (In Russian).

51. Gajvoron T. D., Majnasheva G. M. Resources of educational tourism of specially protected natural territories of Moscow. *Vestnik MGPU* [Bulletin of the Moscow State Pedagogical University]. Series Natural sciences, 2019, no. 4 (36), pp. 47–54 (In Russian).

52. Shul'gina O. V., Vagner B. B. Voronova T. S., Gajvoron T. D., Grushina T. P., Levintov A. E., Majnasheva G. M., Shul'gina D. P. *Resursy obrazovatel'nogo turizma rossijskikh regionov: Central'naya Rossiya: monografiya* [Educational tourism resources of Russian regions: Central Russia: monograph]. Moscow, MGPU Publ., 2016. 252 p. (In Russian).

53. Kolotova E. V. *Rekreatsionnoye resursovedeniye* [Recreational resource studies]. Moscow, RIAT Publ., 1999. 135 p. (In Russian).

54. Donohoe H. M., Needham R. D. Ecotourism: The evolving contemporary definition. *Journal of Ecotourism*, 2006, no. 3, pp. 192–210. DOI: 10.2167/joe152.0.

55. Tey J. A., Chandrashekar R. Analysis of edu-tourism factors among students in public universities in Johor. *Research in Management of Technology and Business*, 2021, vol. 2, no. 2, pp. 241–254. DOI: 10.30880/rmtb.2021.02.02.019.

56. Solov'ev A. P. Educational tourism and cultural heritage: ways of interaction in the Russian Federation. *Zhurnal Instituta Naslediya* [Journal of the Heritage Institute], 2016, no. 1 (4), p. 5 (In Russian).

57. Krum E. V. Development of the model of the export-oriented market of educational services. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta* [Bulletin of the Belarusian State University of Economics], 2012, no. 5, pp. 13–20 (In Russian).

58. Dudina I. A. Characteristics of the capacity of mega-regional academic education markets. *Ekonomika. Informatika* [Economy. Computer science], 2009, issue 11-1, no. 9 (64), pp. 48–56 (In Russian).

59. Zavada G. V. Approaches to improving the information and operational capacity of education at the university. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan State Energy University], 2016, no. 1 (29), pp. 116–121 (In Russian).

60. Andreeva V. L. Evaluation of the attractiveness of educational and ecological trails resources. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2022, no. 2 (258), pp. 94–104 (In Russian).

Информация об авторе

Андреева Виктория Леонидовна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры географии и методики преподавания географии. Белорусский государственный педагогический 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 15.03.2023

УДК 338.482

Д. А. Бессараб

Белорусский государственный технологический университет

**К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛА
ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ТУРИЗМА**

В статье приводятся взгляды автора на возможности использования особо охраняемых территорий с целью развития экологического туризма в Республике Беларусь. Даются сведения о распространении четвертичных ледниковых покровов на территории Республики Беларусь. Прослеживаются связи между их распространением и формированием особенностей быта и ментальной организации населения. Отмечается, что с деятельностью ледников связано размещение на территории Беларуси уникальных природных объектов и этнорелигиозных традиций, встречающихся на крайне ограниченных площадях. Приводится краткое описание наиболее привлекательных из них.

Констатируется, что для поддержания своего биологического существования человек вынужден постоянно осуществлять поиск некоего баланса между экономической выгодой, получаемой от использования природных объектов, и экологической безопасностью. Соблюдение этого баланса – есть прямая жизненная потребность, что приводит к пониманию необходимости осуществления процесса охраны окружающей среды как гарантированного условия дальнейшего существования человека.

Отмечено, что особо охраняемую природную территорию следует рассматривать как консолидирующую и лидирующую единицу в процессе разработки и создания экотуристического кластера, а возможно, и экотуристической дестинации. Тем самым будет заложена основа для формирования экотуристического продукта, имеющего узнаваемый бренд с высоким уровнем осведомленности целевой аудитории о его существовании.

Ключевые слова: туризм, экологический туризм, этнокультурный туризм, развитие туризма в Беларуси, четвертичные оледенения, быт и ментальная организация населения.

Для цитирования: Бессараб Д. А. К вопросу о возможности использования потенциала особо охраняемых территорий для развития экологического туризма // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 120–125. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-14.

D. A. Bessarab

Belarusian State Technological University

**ON THE QUESTION OF THE POSSIBILITY OF USING THE POTENTIAL
SPECIALLY PROTECTED AREAS FOR THE DEVELOPMENT
OF ECOLOGICAL TOURISM**

The article presents the author's views on the possibility of using specially protected territories for the development of ecological tourism in the Republic of Belarus. Information is given on the distribution of Quaternary glacial covers on the territory of the Republic of Belarus. The links between their spread and the formation of the peculiarities of everyday life and the mental organization of the population are traced. It is noted that the activity of glaciers is associated with the distribution of unique natural objects and ethno-religious traditions on the territory of Belarus, which occur in extremely limited areas. A brief description of the most attractive of them is given.

It is stated that in order to maintain their biological existence, a person needs to constantly search for a certain balance between the economic benefits obtained from the use of natural objects and environmental safety. Compliance with this balance is a direct vital necessity, which leads to an understanding of the need to implement the process of environmental protection as a guaranteed condition for the long-term existence of a person.

It is noted that a specially protected natural area should be considered as a consolidating and leading unit in the process of developing and creating an ecotourist cluster, and possibly an ecotourist destination. This will lay the foundation for the formation of an ecotourism product that has a recognizable brand with a high level of awareness of the target audience about its existence.

Keywords: tourism, ecological tourism, ethno-cultural tourism, tourism development in Belarus, quaternary glaciations, life and mental organization of the population.

For citation: Bessarab D. A. On the question of the possibility of using the potential specially protected areas for the development of ecological tourism. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 120–125. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-14 (In Russian).

Введение. Природная среда является единственным источником ресурсов для осуществления возможности существования человека как биологического вида. В этой связи, учитывая постоянно возрастающую численность самого человечества и его технологическую оснащенность, видится закономерным, что процесс изъятия природных ресурсов будет иметь постоянную тенденцию к нарастанию, что следует принять как данность. Эту данность необходимо рассматривать как извлечение из природной среды экономической выгоды, то есть с позиций маркетинга – как благо [1].

Однако, с другой стороны, Закон Республики Беларусь «Об охране окружающей среды» в редакции от 4 января 2022 г. № 145-З [2] определяет, что природная среда представляет собой совокупность компонентов природной среды, природных и природно-антропогенных объектов. Природно-антропогенный объект – это природный объект, измененный в результате хозяйственной и иной деятельности, и (или) объект, созданный человеком, обладающий свойствами природного объекта и имеющий рекреационное и защитное значение. Соответственно, природный объект является собой естественную экологическую систему, природный ландшафт и составляющие их компоненты природной среды, сохранившие свои природные свойства, т. е. обладает способностью к саморегуляции и самовосстановлению.

В этой связи важно понимать, что в процессе извлечения неконтролируемой экономической выгоды вполне становится возможным привести естественные природные объекты в то критическое состояние, в котором они будут лишены возможности осуществлять процесс саморегуляции и самовосстановления. В результате неизбежно произойдут необратимые изменения природных объектов, что может отразиться на состоянии окружающей среды: она станет непригодной для существования человека как биологического вида. Поэтому критическим становится понятие пропускного потенциала территории, которое можно сформулировать как максимальную нагрузку, которую может выдержать природный объект без утраты своих основополагающих функций: саморегуляции и самовосстановления. Значит, пропускной потенциал можно классифицировать как пороговое значение экологической безопасности.

Таким образом, понятие «охрана окружающей среды», понимаемое как комплекс мероприятий, обеспечивающих устойчивое развитие и экологическую безопасность человека, по сути, перерастает в экономическую категорию, так как она обеспечивает экономическую выгоду человека, т. е. является благом.

Основная часть. Одной из возможных форм осуществления природоохранной деятельности является выделение в составе площади страны территорий, имеющих особый статус охраны. В Республике Беларусь эта сфера деятельности регулируется на основе Закона «Об особо охраняемых природных территориях», принятого в 1994 г. В настоящее время действует его редакция от 15.11.2018 г. № 150-З [3], которая определяет правовые основы функционирования особо охраняемых природных территорий (ООПТ), а также их объявления, преобразования и прекращения функционирования.

По состоянию на 01.01.2021 г. в Республике Беларусь насчитывалось 1307 единиц особо охраняемых природных территорий [4]. Приоритетной категорией ООПТ являются заказники, на долю которых приходится 73,98% общей площади охраняемых территорий (1390,3 тыс. га). Заказники республиканского значения занимают 4,7% территории страны и 51,7% общей площади ООПТ.

Среди других категорий ООПТ значительная площадь приходится на долю заповедников и национальных парков – 25,3% общей площади охраняемых территорий, наименьшая – на памятники природы республиканского (0,18%) и местного (0,52%) значения.

Наибольшая доля охраняемых территорий в Республике Беларусь приходится на Брестскую и Витебскую области, наименьшая – на Могилевскую. В пределах областей долевое участие ООПТ существенно различается. Так, их наибольшая доля имеет место в Брестской и Гродненской областях (соответственно 14,9 и 9,9% общей площади территории), наименьшая – в Могилевской (4,5%).

В настоящее время в Беларуси функционируют Березинский биосферный и Полесский государственный радиационно-экологический заповедники, 4 национальных парка (Беловежская пуца, Припятский, Браславские озера и Нарочанский), 381 заказник (из них республиканского значения – 99, местного значения – 428) и 959 памятников природы (из них

республиканского значения 327, местного значения – 632).

В 2018 г. Указом Президента Республики Беларусь № 108 от 13.03.2018 [5] была утверждена Национальная экологическая сеть, которая представляет собой систему природно-территориальных комплексов (ПТК) со специальными режимами природопользования и играет важную роль в поддержании экологического равновесия и обеспечении устойчивого развития территорий, сохранения естественных экологических систем, биологического и ландшафтного разнообразия. В ней также учтены естественные процессы движения живых организмов по территории нашей страны.

В целом природные комплексы и экологические системы занимают порядка 55% территории Республики Беларусь. Они представлены лесами (41,5%), болотами (4,1%), лугами (3,8%), кустарниками (3,2%) и водными объектами (2,2%). Таким образом, главной составляющей особо охраняемых природных территорий страны являются леса, общая площадь которых составляет 9,7 млн га.

Дневная поверхность Беларуси сформировалась под действием ряда факторов, ведущими из которых являются особенности геологического строения, а также геологическая деятельность четвертичных оледенений, которые сформировали современный облик поверхности нашей страны, образовав современные морфометрические формы, унаследовавшие особенности строения подстилающих горизонтов западной части Русской платформы.

В течение четвертичного периода покровные материковые оледенения пять раз распространялись на территорию современной Беларуси [6]. Центры их формирования находились в Фенноскандии – физико-географической стране на северо-западе Европы, включающей территории Швеции, Норвегии, Финляндии и западной части бывших Олонецкой и Архангельской губерний России, которую выделил финский геолог Вильгельм Рамзай в 1898 г.

Первые два ледниковых покрова (наревский и березинский) почти полностью перекрывали территорию нашей страны, останавливаясь лишь у самых южных границ. Днепровский распространился максимально далеко на юг, вплоть до широты Кременчуга, что находится в Полтавской области Украины. Сожский и поозерский льды разместили свои прикраевые зоны на территории современной Беларуси, что отмечилось простиранием гряд и возвышенностей, осложнивших современную поверхность и представленных хаотичным нагромождением обломочного материала. Этими конечными моренами сложена Белорусская гряда, являющая-

ся главным водоразделом бассейнов Балтийского и Черного морей. Поозерский ледник был самым маломощным по простираанию и остановил ход, обозначив свое краевое стояние грядами Браславской, Свентянской, Городокской и Витебской возвышенностей.

Во время деградации льда конечные морены стали своеобразными естественными плотинами, подпруживающими талые ледниковые воды, что привело к формированию на севере Беларуси огромных озер-разливов: Полоцкого, Дисненского, Суражского и др. Со временем эти талые воды, переполнившие котловины, прорывались и направлялись в сторону Полесья, разрабатывая ложбины ледникового выпавивания и размыва, ныне унаследованные крупнейшими современными речными системами Днепра, Березины, Сожа и др. В итоге 10 тыс. лет назад север Беларуси освободился ото льда и последствий его деятельности. Лишь в самых низких местах, на сравнительно небольших участках поверхности сохранились остатки талой воды, представленные современными озерными системами Поозерья – Нарочанской, Браславской, Ушачской и другими группами озер.

Основная же масса талых ледниковых вод, направившись к югу, сосредоточилась в Припятском прогибе, где кристаллический фундамент залегает на максимальных глубинах, и сформировала новый водный бассейн, со времен Древней Греции известный как Геродотово море. Его изображали на всех картах в середине XVI – начале XVII в., но называли уже Сарматским. Адам Гонорий Киркор (1818–1886), белорусский литературный деятель, издатель и краевед-фольклорист, в составленном им 3-м томе «Живописной России» [7, с. 329] писал: «...тысячелетия отделяют нас от той эпохи, когда вся долина Припяти, или так называемое Пинское Полесье, было тоже залито водою, – морем Геродота, страну вод и туманов, как ее называет Дарий Гистасп в своем походе на Скифов... Геродот говорит, что народ Будины, или Вудины, живет над большим озером (морем)...». Но Киркор уже не застал Геродотово моря: «...совсем другой мир представляет нам долина Припяти, это Геродотово море... Составляя самую болотистую часть едва ли не во всей России, долина Припяти меняет свой вид и производимое им впечатление по временам года».

Таким образом, тальми водами последнего, поозерского ледника, на территории Полесской седловины и части Подляско-Брестской впадины сформировалось Геродотово море, а все остальное к северу от него постепенно покрывалось пущами, – густыми, непроходимыми ле-

сами. До нашего времени от тех пущ дошел лишь единственный фрагмент-остаток реликтового первобытного равнинного леса, оцененный ЮНЕСКО как природный феномен и пространство исключительной природной красоты и эстетической важности – «сарматский смешанный лес», территория которого входит в состав государственного природоохранного учреждения «Национальный парк “Беловежская пуща”».

Кроме того, в процессе деградации льда образовались уникальные формы рельефа, осложняющие современную дневную поверхность Беларуси – озы и камы. Первые из них представлены вытянутыми валами высотой до нескольких десятков метров и длиной до 1–2 км. Один из классических образцов – Слободковская озовая гряда – находится на территории ГПУ «Национальный парк “Браславские озера”» между озерами Потех и Недорво. Камовые массивы представлены беспорядочно размещенными холмами, сложенными достаточно хорошо сортированным материалом. Наибольшее количество классических образцов камовых массивов размещено в северной части Беларуси, один из самых известных также находится на территории национального парка «Браславские озера». Им сформирован Масковичский полуостров, разделяющий озера Неспич и Недрово. Выглядит кам как холм с крутыми (до 45°) склонами, поднимающийся над урезом воды более чем на 30 м.

Первобытный лес во многом предопределил образ жизни предков белорусов. Он обеспечивал доступ к источнику энергии, определял характер розжига огня и принципы его поддержания, содействовал выбору преимущественных способов тепловой обработки пищи. Давал мясо, мед, грибы, ягоды, плоды и орехи, лекарственные растения, поставлял строительные и утепляющие материалы. К тому же лесные сенокосы и пастбища обеспечивали пищей тягловую силу и домашний скот. Лес обеспечивал жизнь, но и человек в использовании леса ограничивал себя, о чем говорится в 10-м разделе Статута Великого княжества Литовского от 1566 г. «О пущу, о ловы, о дерево бортное, о озера и сеножати» [8].

Кроме того, отличительной чертой морены любого вида являются включения обломочного материала, равномерно распределенного по всему телу горной породы. Обломки, особенно в северной и центральной части Беларуси, встречаются повсеместно. Эти глыбы являются непременным атрибутом и составной частью современного ландшафта. Многие из них объявлены памятниками природы. Самый крупный валун находится у д. Горки Шумилинского

района, что в 40–45 км к северу от Витебска. У обломка имеется два названия: Чортаў камень и Вялік камень. Сложен он гранитом рапакиви, что дословно с финского означает «гнилой камень», с характерными овоидами – крупными шаровидными вкрапленниками в достаточно слабо раскристаллизованной гранитной массе. Гранит рапакиви широко распространен в Швеции и Финляндии, встречается в Карелии и в районе г. Выборга Ленинградской области, что свидетельствует о направлении движения льда. Это второй по размеру валун на территории Европы, имеющий длину 11 м, ширину – 5,6 м и над дневной поверхностью возвышающийся на 2,8 м.

С деятельностью ледниковых покровов, распространявшихся на территорию Европы в четвертичном периоде, и постледниковых процессов связано размещение на территории Беларуси уникальных природных объектов и этнорелигиозных традиций, встречающихся на крайне ограниченных площадях.

К наиболее аттрактивным из них с точки зрения возможности использования в экологическом и этнокультурном туризме следует отнести названные ниже и ряд других.

В Минске находится единственный в Европе Музей валунов по ул. Академика Купревича, остатки языческого капища на ул. Лодочной, а также в 3,7 км от МКАД, в п. Городище, находятся валы Менского городища – место событий «Слова о полку Игореве».

В Логойском районе наблюдается сочетание краевой зоны материкового оледенения сожского возраста и антропогенного «горного» ландшафта в районе расположения республиканского горнолыжного центра «Силичи». Уникальным объектом является Логойская астроблема – ударный кратер с центром в районе д. Малиновка Гайненского с/с, образовавшийся около $42,3 \pm 1,1$ млн лет назад при падении астероида.

В д. Домжерицы Лепельского района находится ГПУ «Березинский биосферный заповедник», в Полоцком районе – языческое капище – астрономическая обсерватория на оз. Яново, в Ушачском районе – языческое капище на оз. Паульское, в Полоцке – городище, р. Полота, Софийский собор, валун «Борис-хлебник», в Шумилинском районе у д. Горки – Чортаў камень или Вялік камень, второй по величине валун в Европе.

Заключение. Учитывая наличие столь богатого природного потенциала, в Государственной программе «Беларусь гостеприимная» на 2021–2025 гг. [9] закономерно отмечено, что его широкое использование для развития туризма является одной из важнейших задач, а

данный вид туризма одним из самых успешных по темпам развития. Более того, экологический туризм следует рассматривать как пример устойчивого туризма, так как он основывается и успешно реализует на практике главные принципы концепции устойчивого развития, как, например, природопользование, не приводящее к деградации ресурсов, поскольку для восстановления и охраны последних используется часть выгод от его развития.

Традиционно считается, что все многообразие видов экологического туризма можно объединить в два основных типа: в границах особо охраняемых природных территорий и вне этих границ. Если учесть, что экологический туризм изначально возник как путешествие с целью преимущественного посещения природных территорий, отличающихся особой привлекательностью прежде всего с эстетической и рекреационной точек зрения, то естественным будет отметить и усилия государственных органов по разработке нормативов их охраны. Процесс выделения ООПТ различного ранга особенно активно стал протекать начиная с семидесятых годов прошлого столетия, и вызван он был в первую очередь резко возросшим нерегулируемым экологическим спросом, который заставил достаточно серьезно задуматься о деградации природных экосистем, массово задействованных в туризме. Статус охраняемой территории позволил частично решить проблему путем оптимизации пропускного потенциала территории. Таким образом, мировой опыт развития экологического туризма прежде всего ориентируется

на его приоритетном продвижении в пределах особо охраняемых территорий, что следует учитывать и в процессе организации экологического туризма в нашей стране.

Так как в Беларуси существует необходимость разработки мероприятий по формированию и продвижению данного вида туризма, нужно принимать во внимание те ООПТ, которые могут быть перспективными для развития экологического туризма. К их числу можно отнести Музей валунов, Вялік камень, капища на оз. Яново и Паульское, объявленные памятниками природы Беларуси.

В данном случае особо охраняемую природную территорию следует рассматривать как консолидирующую и лидирующую единицу в процессе разработки и создания экотуристического кластера. Тем самым будет заложена основа для формирования экотуристического продукта, имеющего узнаваемый бренд с высоким уровнем осведомленности целевой аудитории о его существовании. Это, в свою очередь, отражается на лояльности к нему потенциального потребителя, увеличивает доверие целевой аудитории, что трансформируется в формирование его положительного имиджа. Таким образом, можно констатировать, что в маркетинговом отношении ООПТ, по сути, подает себя и свой статус, оценивая привлекательность своего потенциала, формируя свой территориальный миф за счет использования уникальности потенциала и особенностей историчности составляющих его элементов как базовой структурной модели туристического имиджа.

Список литературы

1. Котлер Филип. Основы маркетинга. М.: Прогресс, 1991. 733 с.
2. Об охране окружающей среды: Закон Респ. Беларусь, 26 нояб. 1992 г., № 1982-ХП: в ред. Закона Респ. Беларусь от 04.01.2022 г. № 145-3 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=v19201982> (дата обращения: 07.03.2023).
3. Об особо охраняемых природных территориях: Закон Респ. Беларусь, 20 окт. 1994 г., № 3335-ХП: в ред. Закона Респ. Беларусь от 15.11.2018 г. № 150-3 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=H11800150&p1=1> (дата обращения: 07.03.2023).
4. Юшкевич Н. Т., Бессараб Д. А. Планирование и организация экологического туризма. Минск: БГТУ, 2022. 213 с.
5. Горецкий Г. И. Аллювиальная летопись великого Пра-Днепра. М.: Наука, 1970. 490 с.
6. Об экологической сети: Указ Президента Респ. Беларусь, 13 марта 2018 г., № 108 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P31800108&p1=1> (дата обращения: 07.03.2023).
7. Живописная Россия: Отечество наше в его земельном, историческом, племенном, экономическом и бытовом значении: Литовское и Белорусское Полесье: репринт. и воспроизведение изд. 1882 г. Минск: БелЭн, 1993. 550 с.
8. Сапега Леў. Статут ВКЛ 1566 года. Разд. 10 // Викитека. URL: https://be.wikisource.org/wiki/Статут_ВКЛ_—_Разьдзел_10._О_пушу,_о_ловы,_о_дерево_бортное,_о_озера_и_сеножати (дата обращения: 10.03.2023).
9. Об утверждении государственной программы «Беларусь гостеприимная» на 2021–2025 годы: постановление Совета Министров Республики Беларусь, 29 янв. 2021 г., № 58 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. URL: <http://www.pravo.by/document> (дата обращения: 09.03.2023).

References

1. Kotler Filip. *Osnovy marketinga* [Basics of Marketing]. Moscow, Progress Publ. 1991. 733 p. (In Russian).
2. On Environmental Protection: the Law of the Republic of Belarus, 26 November 1992, no. 1982-HP: ed. the Law of the Republic of Belarus no. 145-Z, 04.01.2022. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=v19201982> (accessed 07.03.2023) (In Russian).
3. On specially protected natural territories: the Law of the Republic of Belarus, 20 October 1994, no. 3335-HP: ed. the Law of the Republic of Belarus, 15.11.2018, No. 150-Z. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=H11800150&p1=1> (accessed 07.03.2023) (In Russian).
4. Yushkevich N. T., Bessarab D. A. *Planirovaniye i organizatsiya ekologicheskogo turizma* [Planning and organization of ecological tourism]. Minsk, Belarusian State Technological University Publ., 2022. 213 p. (In Russian).
5. Goretsky G. I. *Allyuvial'naya letopis' velikogo Pra-Dnepra* [Alluvial chronicle of the Great Dnieper]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 490 p. (In Russian).
6. About the ecological network: the Decree of the President of the Republic of Belarus, 13 March, 2018, no. 108. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P31800108&p1=1> (accessed 07.03.2023) (In Russian).
7. *Zhivopisnaya Rossiya: Otechestvo nashe v ego zemel'nom, istoricheskom, plemennom, ekonomicheskoy i bytovom znachenii: Litovskoye i Belorusskoye Poles'e* [Picturesque Russia: Our Fatherland in its land, historical, tribal, economic and everyday meaning: Lithuanian and Belarusian Polesie]. Minsk, BelEn Publ., 1993. 550 p. (In Russian).
8. Sapega Lev. Statute Grand Duchy of Lithuania 1566. Section 10. Available at: https://be.wikisource.org/wiki/Статут_ВКЛ_—_Разъезд_10._О_пущу,_о_ловы,_о_дерево_бортное,_о_озера_и_сеножати (accessed 10.03.2023) (In Russian).
9. On the approval of the state program “Belarus hospitable” for 2021–2025: the Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, January 29, 2021, no. 58. Available at: <http://www.pravo.by/document> (accessed 09.03.2023).

Информация об авторе

Бессараб Дмитрий Александрович – кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры туризма, природопользования и охотоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dibess1@yandex.ru

Information about the author

Bessarab Dmitry Aleksandrovich – PhD (Geographical), associate Professor, Assistant Professor, the Department of Tourism, Nature Management and Hunting. Belarusian State Technological University (13 a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dibess1@yandex.ru

Поступила 14.03.2023

ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС. ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

TIMBER PROCESSING COMPLEX. TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL QUESTIONS

УДК 630*31(043.3)

Р. О. Короленя, Ю. А. Бедная

Белорусский государственный технологический университет

ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ О ЗАКОНЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ДВИЖЕНИЯ СОРИМЕНТОВОЗА ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ДРЕВЕСИНЫ

Эффективное оперативное управление процессом перевозки заготовленной древесины является очень важной задачей. Ведь во время лесозаготовительной деятельности перевозка древесины может осуществляться в достаточно сложных условиях: различным потребителям древесины, по разным маршрутам работы сортиментовозов, в рамках ограничений по срокам доставки и т. д. Выбор стратегии оперативного управления в таких условиях сложен. Одной из проблем, возникающих при выборе и принятии рациональных решений, считается сложность теоретического определения продолжительности процесса перевозки древесины потребителям, в связи с чем изучение времени движения сортиментовозов является актуальной задачей.

В статье указаны основные факторы, влияющие на время движения сортиментовоза при перевозке заготовленной древесины. Рассмотрены основные недостатки существующих методов, методик и алгоритмов по определению скоростей движения и времени движения сортиментовозов. Дано описание методики проведенных исследований по определению продолжительности движения сортиментовозов на различных маршрутах перевозки древесины. Описана методика проверки выдвинутой авторами гипотезы о том, что среднее время прохождения сортиментовозами 1 км, как случайной величины, подчинено нормальному закону распределения. Приведено сравнение реальных значений времени работы сортиментовозов с данными, полученными в результате исследований. Максимальное отклонение расчетных показателей времени движения от фактических составило до 12%.

Ключевые слова: время движения, сортиментовоз, перевозка древесины, маршрут, нормальный закон распределения, гипотеза.

Для цитирования: Короленя Р. О., Бедная Ю. А. Проверка гипотезы о законе распределения времени движения сортиментовоза при перевозке древесины // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 126–133. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-15.

R. O. Korolenia, Yu. A. Bednaya

Belarusian State Technological University

HYPOTHESIS TESTING ON THE DISTRIBUTION LAW OF TRAVEL TIME OF A TIMBER TRUCK DURING TIMBER TRANSPORTATION

Effective operational management of the harvested timber transportation process is the most important task. When carrying out logging operations, transportation of harvested timber can be carried out in quite complex conditions: different consumers of timber, different routes of timber trucks, within the limits of delivery time constraints, etc. The choice of operational management strategy in such conditions is difficult. One of the problems arising in selecting and making rational decisions is the difficulty

of theoretically determining the duration of timber transportation to consumers. In this regard, the study of the time of movement of log trucks is an urgent task.

The article specifies the main factors influencing the movement time of log trucks when transporting harvested timber. The main drawbacks of the existing methods, techniques and algorithms of determining movement speeds and time of log carrier movement are considered. The methods of the conducted researches for determining the time of movement of assortment trucks on different timber transportation routes are described. The article describes the method of testing the hypothesis proposed by the authors that the average movement time of log trucks as a random variable is subject to the normal distribution law. The comparison of real values of log trucks operation time with the data obtained as a result of the study is given. The maximum deviation of the calculated indicators of movement time from the actual ones was up to 12%.

Keywords: travel time, log truck, timber transportation, route, normal distribution law, hypothesis.

For citation: Korolenia R. O., Bednaya Yu. A. Hypothesis testing on the distribution law of travel time of a timber truck during timber transportation. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 126–133. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-15 (In Russian).

Введение. Заготовка и вывозка древесины занимают одно из центральных мест в деятельности лесозаготовительных предприятий и лесохозяйственных организаций. Этот процесс довольно сложный, так как объект труда сосредоточен на большой территории, а продукт труда лесозаготовителя необходимо доставить в центры промышленной переработки или непосредственного использования на значительные расстояния, иногда по слабоустроенным лесным дорогам, дорогам общего пользования с различными типами покрытия и улицам населенных пунктов.

Рациональный выбор стратегии организации поставок древесины потребителям в таких условиях, особенно с учетом постоянного роста объемов заготовок древесины [1], неосуществим без решения вопросов определения времени транспортного процесса. Поэтому особую важность приобретают вопросы разработки новых подходов к определению продолжительности транспортировки древесины потребителям.

Основная часть. На время движения сортировочных вагонов влияют в общем случае различные факторы, основные из которых условно можно разделить на четыре группы: «Автомобиль», «Водитель», «Дорога» и «Общие» [2–12].

Автомобиль. Транспортное средство: база, колея, высота центра тяжести, габаритные размеры, сцепной вес. Двигатель: тип двигателя; техническое состояние двигателя; максимальный момент и максимальная мощность двигателя, частота вращения коленчатого вала, при которых они развиваются; приемистость двигателя; топливно-экономические характеристики двигателя; тип трансмиссии; передаточные числа трансмиссии; тип шин; параметры, определяющие сопротивление их качению и уводу;

радиус качения шин. Другие параметры: общий вес транспортного средства; сопротивление воздуха движению; инерционность транспортной единицы; потери энергии во вспомогательных агрегатах двигателя и агрегатах трансмиссии; тормозные свойства автомобиля и двигателя; номинальный (средний) коэффициент сопротивления качению; работоспособность агрегатов при различных режимах движения; параметры подвески [2, 4, 6].

Водитель. Зрительное и слуховое, двигательное восприятие обстановки движения; острота и точность реакции; устойчивость внимания; возраст и опыт водителя, его профессиональное мастерство; нервно-психическое состояние; особенности вестибулярного аппарата; темперамент [2].

Дорога. Уклоны продольного профиля; протяженности участков с одинаковыми уклонами; количество переломов продольного профиля; радиусы и длины переходных кривых; поперечные уклоны; радиусы и длины кривых в плане; характеристика микропрофиля поверхности дороги [2, 4, 6].

Общие. Общий характер движения (населенный пункт или вне, время суток, метеорологические условия); состав движения; интенсивность движения; число пересечений в одном уровне; способ регулирования движения; характер ограничений и запрещений; число регламентированных остановок; наличие помех [2, 4, 6].

Изучением вопроса расчета скорости и времени движения лесовозных транспортных средств занимались многие ученые и специалисты [2–12].

Разработанные методы (графические, графоаналитические, метод приближенного интегрирования уравнения движения и др.), а также

основные республиканские нормы [13] не нашли широкого практического применения в лесозаготовительном производстве.

Как показывают результаты, получаемые по основным из существующих методов, значения времени движения либо имеют ограниченную достоверность, либо сложны и громоздки для использования на практике в силу необходимости проведения значительного объема экспериментально-производственных исследований. Все это и предопределяет малое использование существующих методов и методик в лесозаготовительном производстве.

Кроме того, аналитически и однозначно выделить время движения с учетом факторов всех четырех групп, большинство из которых являются случайными, затруднительно.

Для определения скоростей движения лесовозных транспортных средств и времени их движения профессор В. И. Алябьев и др. указывают на целесообразность использования вероятностных моделей [14].

Ввиду всего вышесказанного, для получения временных характеристик движения сортиментовозов, на наш взгляд, необходимо использовать статистические методы. Именно поэтому в качестве рабочей гипотезы выступает следующая: время движения на маршруте для конкретного вида транспортного средства можно определить, зная среднее время проезда 1 км по заданным маршрутам работы в грузовом и порожнем направлениях, протяженности этих маршрутов, а также учитывая закон распределения времени движения как случайной величины.

Для проверки данной гипотезы были проведены исследования работы сортиментовоза МАЗ-630308 с прицепом МАЗ-83781020, включающие следующие этапы.

Этап 1. Проведение предварительной серии эксперимента. Цель – определение необходимого объема выборки для порожнего и грузового направлений.

Определение необходимого объема выборки проводилось по методике, описанной в работе [15].

Количество замеров времени движения определяли по зависимости (1):

$$n = \frac{t^2 \cdot S^2}{\Delta^2}, \quad (1)$$

где n – необходимое количество замеров времени движения; t – значение критерия Стьюдента при заданном уровне значимости и числе степеней свободы; S^2 – выборочная дисперсия, вычисляемая по предварительно определенным

значениям времени движения; Δ – предельное отклонение выборочного среднего значения времени движения от его математического ожидания, мин.

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты предварительного определения времени движения

Номер замера, показатели	Порожнее направление, мин	Грузовое направление, мин
1	1,93	3,25
2	1,08	2,50
3	1,55	2,60
4	1,23	2,60
5	1,39	2,60
6	1,30	2,60
7	0,98	2,64
8	1,19	2,60
9	1,88	2,00
10	2,15	1,90
Средние значения, мин	1,47	2,53
Дисперсия, мин ²	0,157	0,137
Коэффициент Стьюдента	2,26	2,26
Погрешность	0,10	0,10
Количество опытов	80	70

Объемы выборки были приняты равными 80 значениям времени для каждого из направлений.

Этап 2. Получение значений времени движения сортиментовозов на маршрутах работы в порожнем и грузовом направлениях.

Необходимые данные были получены с помощью навигационного оборудования, которое установлено на сортиментовозах предприятия. Для этого проведена выборка фактических данных о времени движения сортиментовозов по различным маршрутам работы в грузовом и порожнем направлениях. Кроме того, изучались маршруты на предмет непредусмотренных технологическим процессом простоев, пробегов и других нерегламентированных действий водителей сортиментовозов. Полученные значения времени проезда 1 км пути в порожнем и грузовом направлениях представлены в табл. 2.

Над всеми полученными значениями (табл. 2) была проведена проверка и исключение грубых ошибок.

Таблица 2
Значения времени проезда 1 км, мин

Порожнее направление				
2,6	2,1	1,9	1,7	1,2
2,7	2,1	1,9	1,7	1,2
2,5	2,1	1,9	1,7	1,2
2,8	2,1	1,9	1,7	1,1
2,2	2,3	1,9	1,7	1,1
2,2	2,3	1,8	1,7	1,1
2,2	2,3	1,8	1,7	1,1
2,2	2,3	1,8	1,6	1,1
2,2	2,3	1,8	1,6	1,1
2,2	1,9	1,8	1,6	1,3
2,2	1,9	1,8	1,6	1,2
2,2	1,9	1,8	1,6	1,3
2,2	1,9	1,8	1,6	1,3
2,2	1,9	1,8	1,5	0,9
2,2	1,9	1,7	1,5	0,9
2,1	1,9	1,7	1,5	0,9
Грузовое направление				
3,2	2,6	2,2	2,0	1,6
3,1	2,5	2,2	1,9	1,6
3,1	2,5	2,2	1,9	1,5
3,1	2,5	2,2	1,9	1,5
3,1	2,5	2,2	1,9	1,5
2,9	2,5	2,2	1,8	1,2
2,9	2,4	2,2	1,8	1,2
2,9	2,4	2,2	1,8	1,2
2,9	2,4	2,2	1,7	1,1
2,8	2,4	2,2	1,7	1,1
2,8	2,4	2,2	1,7	1,1
2,8	2,4	2,1	1,6	1,1
2,7	2,4	2,1	1,6	1,1
2,7	2,3	2,1	1,6	1,1
2,7	2,3	2,1	1,6	1,1
2,6	2,3	2,0	1,6	0,9

Этап 3. Обработку результатов исследований времени проезда 1 км проводили на основании методики, которая была представлена в работе [16]. Согласно данной методике, первоначально определяются такие показатели, как размах выборки значений времени движения (2), количество интервалов (3) и длина интервала (4):

$$W = t_{\max} - t_{\min}; \tag{2}$$

$$k = 1 + 3,21 \cdot \lg n; \tag{3}$$

$$h = \frac{W}{k}, \tag{4}$$

где W – размах выборки значений времени движения, мин; t_{\max} – максимальное значение времени движения, мин; t_{\min} – минимальное

значение времени движения, мин; k – количество интервалов; n – число значений времени в выборке; h – длина интервала, мин.

После определения указанных показателей находили количество значений времени проезда 1 км в выборке в каждом интервале, их относительные частоты и высоты.

Значения интервальных статистических рядов представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3
Интервальный статистический ряд значений времени проезда 1 км в порожнем направлении

Интервал			Частота	Относительная частота	Высота
начало	конец	середина			
0,90	1,17	1,04	10,00	0,13	0,46
1,17	1,44	1,31	6,00	0,08	0,28
1,44	1,71	1,58	15,00	0,19	0,69
1,71	1,98	1,85	24,00	0,30	1,11
1,98	2,26	2,12	16,00	0,20	0,74
2,26	2,53	2,39	6,00	0,08	0,28
2,53	2,81	2,67	3,00	0,04	0,14
Сумма			80	1	–

Таблица 4
Интервальный статистический ряд значений времени проезда 1 км в грузовом направлении

Интервал			Частота	Относительная частота	Высота
начало	конец	середина			
0,90	1,23	1,066	10	0,125	0,381
1,23	1,558	1,394	4	0,05	0,152
1,558	1,886	1,722	15	0,1875	0,572
1,886	2,214	2,05	18	0,225	0,686
2,214	2,542	2,378	15	0,1875	0,572
2,542	2,87	2,706	9	0,1125	0,343
2,87	3,208	3,039	9	0,1125	0,343
Сумма			80	1	–

После этого строились гистограммы относительных частот попадания значений времени в расчетные интервалы для порожнего (рис. 1) и грузового (рис. 2) направлений.

По виду гистограмм была выдвинута статистическая гипотеза о нормальности закона распределения времени проезда 1 км как случайной величины. Далее определяли точечную оценку математического ожидания (выборочное среднее) по зависимости

$$t_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k t_i^c \cdot n_i, \quad (5)$$

где t_{cp} – выборочное среднее значений ряда, мин; t_i – текущее значение времени движения, мин; t_i^c – середина интервала, мин; n_i – частота попаданий в интервал.

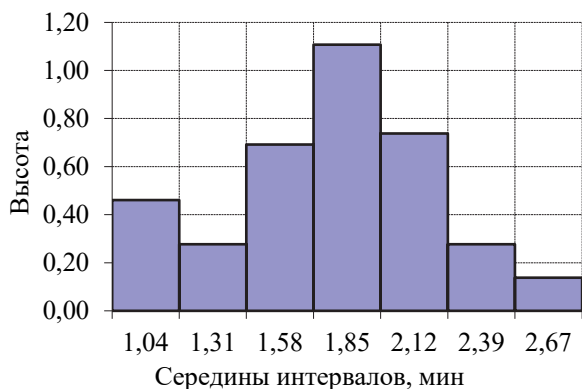


Рис. 1. Гистограмма относительных частот для порожнего направления

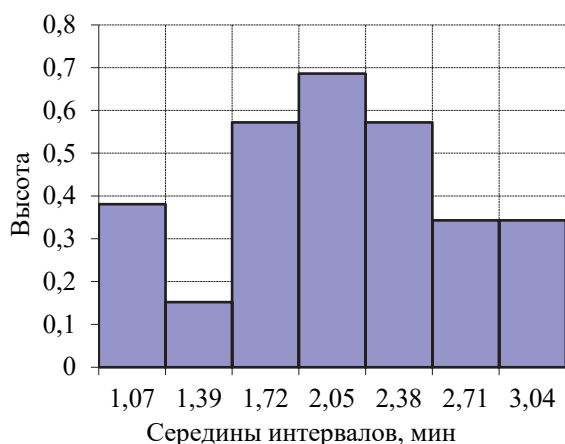


Рис. 2. Гистограмма относительных частот для грузового направления

Кроме того, вычисляли исправленное выборочное среднее квадратическое отклонение по зависимости

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - t_{cp})^2}. \quad (6)$$

После этого рассчитывали теоретические вероятности по зависимости (7):

$$p_i = \Phi\left(\frac{t_{i+1} - t_{cp}}{S}\right) - \Phi\left(\frac{t_i - t_{cp}}{S}\right). \quad (7)$$

где Φ – функция Лапласа [15, 16].

Далее определяли наблюдаемую величину критерия Пирсона χ^2 по зависимости (8):

$$\chi_{набл}^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - n \cdot p_i)^2}{n \cdot p_i}. \quad (8)$$

Контроль вычислений осуществлялся по равенству (9):

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i^2}{n \cdot p_i} - n = \chi_{набл}^2. \quad (9)$$

Критерием принятия гипотезы служило неравенство (10):

$$\chi_{набл}^2 < \chi_{\alpha;v}^2. \quad (10)$$

где $\chi_{\alpha;v}^2$ – теоретическое значение критерия Пирсона при заданном уровне значимости и числе степеней свободы $\chi_{\alpha;v}^2 = 9,488$; α – уровень значимости, $\alpha = 0,05$; v – число степеней свободы, равное для нормального закона распределения разности между числом интервалов и числом 3.

Если условие (10) выполняется, то статистическая гипотеза о нормальном законе распределения времени проезда 1 км по маршруту принимается, а если указанное неравенство не выполняется, то гипотеза отвергается.

Результаты выполненных расчетов представлены в табл. 5 и 6.

Таблица 5
Определение критерия Пирсона $\chi_{набл}^2$ для порожнего направления

Границы интервала		Частота n_i	Теоретическая вероятность p_i	$\frac{(n_i - n \cdot p_i)^2}{n \cdot p_i}$	$\frac{n_i^2}{n \cdot p_i}$
$-\infty$	1,171	10	0,074	2,812	16,892
1,171	1,442	6	0,137	2,221	3,295
1,442	1,713	15	0,225	0,500	12,501
1,713	1,984	24	0,249	0,843	28,938
1,984	2,255	16	0,185	0,101	17,324
2,255	2,526	6	0,092	0,253	4,888
2,526	$+\infty$	3	0,039	0,004	2,897
Сумма			0,999	6,733	86,734

Расчетами установлено, что наблюдаемое значение критерия Пирсона для порожнего направления равно 6,733; для грузового направления – 6,324.

Таким образом, из расчетов видно, что поскольку выполняется условие (10), то статистическая гипотеза принимается для грузового и порожнего направлений.

Таблица 6
Определение критерия Пирсона $\chi^2_{\text{набл}}$
для грузового направления

Границы интервала		Частота n_i	Теоретическая вероятность p_i	$\frac{(n_i - n \cdot p_i)^2}{n \cdot p_i}$	$\frac{n_i^2}{n \cdot p_i}$
$-\infty$	1,230	10	0,074	2,845	16,942
1,230	1,558	4	0,113	2,829	1,765
1,558	1,886	15	0,184	0,006	15,309
1,886	2,214	18	0,220	0,010	18,427
2,214	2,542	15	0,194	0,017	14,500
2,542	2,870	9	0,126	0,120	8,018
2,870	$+\infty$	9	0,089	0,498	11,379
Сумма			0,999	6,324	86,340

Этап 4. По полученным данным, зная, что выборочное среднее значение времени проезда 1 км для порожнего направления равно 1,78 мин, а для грузового – 2,08 мин, была проведена оценка адекватности этих значений. Для этого по методике, которая была изложена

в работе [16], проводилась оценка однородности дисперсий значений времени движения по 10 маршрутам в грузовом и порожнем направлениях с учетом критерия Фишера, что показало высокую сходимость результатов.

Методика оценки также включала расчет процентного расхождения между фактическим временем движения по реальным маршрутам работы сортиментовозов и временем движения, рассчитанным с помощью полученных значений выборочного среднего. Максимальный размах значений времени движения на маршрутах в грузовом и порожнем направлениях не превышал 12%.

Заключение. В результате была подтверждена рабочая гипотеза о том, что среднее время проезда сортиментовозами 1 км подчинено нормальному закону распределения. Полученные в итоге значения выборочного среднего времени проезда 1 км в грузовом и порожнем направлениях были рекомендованы для практического использования при планировании работы сортиментовоза МАЗ-630308 с прицепом МАЗ -83781020.

Список литературы

1. Заготовка и переработка древесных лесных ресурсов // Официал. сайт М-ва лесного хоз-ва Респ. Беларусь. URL: <https://www.mlh.by/our-main-activites/forest/zagotovka-i-ispolzovanie-drevesnykh-lesnykh-resursov/> (дата обращения: 01.02.2023).
2. Нефедов А. Ф., Высочкин Л. Н. Планирование эксперимента и моделирование при исследовании эксплуатационных свойств автомобилей. Львов: Вища школа, 1976. 160 с.
3. Вывозка леса автопоездами. Техника. Технология. Организация / И. Р. Шегельман [и др.]. СПб.: ПРОФИКС, 2008. 304 с.
4. Пладов А. В. Совершенствование методов обоснования рациональных эксплуатационных параметров лесовозных автопоездов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Петрозаводск, 2007. 20 с.
5. Короленя Р. О. Результаты исследований временных характеристик движения сортиментовозов // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2009. – Вып. XVII. С. 67–70.
6. Насковец М. Т., Короленя Р. О. Классификация маршрутов транспортировки сортиментов с использованием XYZ-анализа // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2010. Вып. XVIII. С. 71–75.
7. Алябьев В. И. Оптимизация производственных процессов на лесозаготовках. М.: Лесная пром-сть, 1977. 232 с.
8. Короленя Р. О. Классификация маршрутов перевозки древесины и определение продолжительности движения по ним сортиментовозов в условиях работы лесохозяйственных учреждений Республики Беларусь // Технология и оборудование лесопромышленного комплекса: сб. науч. тр. СПбГЛТУ. 2013. Вып. 6. С. 109–116.
9. Мохирев А. П., Рукомойников К. П., Мазуркин П. М. Рейтинг экспериментов по многофакторному анализу вывозки древесины с лесных участков // Успехи современного естествознания. 2021. № 2. С. 26–33. DOI: 10.17513/use.37570.
10. Короленя Р. О. Результаты статистической обработки данных, характеризующих время работы сортиментовозов на вывозке древесины // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 85-й науч.-техн. конф. профес.-преподоват. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 1–13 февр. 2021 г. Минск, 2021. С. 97–99.
11. Влияние условий движения на скоростные режимы транспортных потоков при вывозке древесины / А. В. Скрыпников [и др.] // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 4. С. 153.

12. Makeev V. N., Dymova N. N., Dolmatov D. V. Определение технической скорости движения лесовозных автопоездов // Лесотехнический журнал. 2011. № 3(3). С. 81-83.

13. Отраслевые республиканские нормы выработки и расценки на работы в лесном хозяйстве: Сборник 3. Вывозка древесины на рубках ухода за лесом и рубках главного пользования. Книга 2. Вывозка древесины на рубках главного пользования. Минск: Белгипролес, 2002. 268 с.

14. Сухопутный транспорт леса / В. И. Алябьев [и др.]. М.: Лесная пром-сть, 1990. 413 с.

15. Пижурич А. А. Основы научных исследований в деревообработке: учебник для вузов. М.: МГУЛ, 2005. 305 с.

16. Игнатенко В. В., Пыжкова О. Н., Яроцкая Л. Д. Высшая математика. Математические методы и модели в расчетах на ЭВМ. Лабораторный практикум: учеб. пособие. Минск: БГТУ 2006. 126 с.

References

1. Harvesting and processing timber resources. Available at: <https://www.mlh.by/our-main-activities/forest/zagotovka-i-ispolzovanie-drevesnykh-lesnykh-resurov/> (accessed 01.02.2023) (In Russian).

2. Nefedov A. F., Vysochkin L. N. *Planirovaniye eksperimenta i modelirovaniye pri issledovanii ekspluatatsionnykh svoystv avtomobiley* [Experimental planning and modelling in the study of vehicle performance]. L'vov, Vishcha shkola Publ., 1976. 160 p. (In Russian).

3. Shegelman I. R., Skrypnik V. I., Kuznetsov A. V., Pladov A. V. *Vyvozka lesa avtopoyezdami. Tekhnika. Tekhnologiya. Organizatsiya* [Timber hauling by road-train. Technique. Technology. Organisation]. St. Petersburg, PROFIKS Publ., 2008. 304 p. (In Russian).

4. Pladov A. V. *Sovershenstvovaniye metodov obosnovaniya ratsional'nykh ekspluatatsionnykh parametrov lesovoznykh avtopoyezdov. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Improving the justification methods for rational operational parameters of timber trucks. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Petrozavodsk, 2007. 20 p. (In Russian).

5. Korolenia R. O. The results of research on the temporal characteristics of the movement of log trucks. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2009, issue XVII, pp. 67–70 (In Russian).

6. Naskovets M. T., Korolenia R. O. Classification of assortment transport routes using XYZ analysis. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2010, issue XVIII, pp. 71–75 (In Russian).

7. Alyab'ev V. I. *Optimizatsiya proizvodstvennykh protsessov na lesozagotovkakh* [Optimization of production processes in logging]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 232 p. (In Russian).

8. Korolenia R. O. Classification of timber transportation routes and determination of the duration of movement of log trucks on them in the conditions of forestry institutions of the Republic of Belarus. *Tekhnologiya i oborudovaniye lesopromyshlennogo kompleksa: sbornik nauchnykh trudov SPbGLTU* [Technology and equipment for the timber industry: a collection of scientific papers from St. Petersburg State Forestry University], 2013, issue 6, pp. 109–116 (In Russian).

9. Mokhiev A. P., Rukomoynikov K. P., Mazurkin P. M. Ranking of experiments in multivariate analysis of timber removals from forest plots. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya* [Advances in modern natural science], 2021, no. 2, pp. 26–33. DOI: 10.17513/use.37570 (In Russian).

10. Korolenia R. O. Results of statistical processing of log truck operating times for timber hauling. *Lesnaya inzheneriya, materialovedeniye i dizayn: materialy 85-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorско-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Forest Engineering, Material Science and Design: proceedings of the 85th scientific and technical conference of academic staff, researchers and PhD students (with international participation)]. Minsk, 2021, pp. 97–99 (In Russian).

11. Skrypnikov A. V., Kondrashova E. V., Skvortsova T. V., Dorokhin S. V. Influence of traffic conditions on traffic speeds in timber hauling. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii* [Modern knowledge-intensive technologies], 2014, no. 4, p. 153 (In Russian).

12. Makeev V. N., Dymova N. N., Dolmatov D. V. Determining the technical speed of timber trucks. *Lesotekhnicheskyy zhurnal* [Forestry Journal], 2011, no. 3 (3), pp. 81–83 (In Russian).

13. *Otraslevyye respublikanskiye normy vyrabotki i rastsenki na raboty v lesnom khozyaystve. Sbornik 3. Vyvozka drevesiny na rubkakh ukhoda za lesom i rubkakh glavnogo pol'zovaniya. Kniga 2. Vyvozka drevesiny na rubkakh glavnogo pol'zovaniya* [Branch republican norms of production and rates for works in forestry. Collection 3. Timber extraction on thinning and final felling. Book 2. Removal of wood on thinning operations]. Minsk, Belgiproles Publ., 2002. 268 p. (In Russian).

14. Alyab'ev V. I., Grekhov G. F., Il'in B. A., Kuvaldin B. I. *Sukhoputnyy transport lesa* [Forest land transport]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 413 p. (In Russian).

15. Pizhurin A. A. *Osnovy nauchnykh issledovaniy v derevoobrabotke* [Fundamentals of scientific research in woodworking]. Moscow, MGUL Publ., 2005. 305 p. (In Russian).

16. Ignatenko V. V., Pyzhkova O. N., Yarotskaya L. D. *Vysshaya matematika. Matematicheskiye metody i modeli v raschetakh na EVM* [Higher mathematics. Mathematical methods and models in computer calculations]. Minsk, BGTU Publ., 2006. 126 p. (In Russian).

Информация об авторах

Короленя Руслан Олегович – доцент кафедры информатики и веб-дизайна. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: korolenia@belstu.by

Бедная Юлия Александровна – студент. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: bednaja3423@gmail.com

Information about the authors

Korolenia Ruslan Olegovich – Assistant Professor, the Department of Informatics and Web-Design. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: korolenia@belstu.by

Bednaya Yuliya Aleksandrovna – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bednaja3423@gmail.com

Поступила 20.03.2023

УДК 630.31:656.02

Р. О. Короленя, Е. И. Барташевич

Белорусский государственный технологический университет

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ
СОРТИМЕНТОВОЗА НА МАРШРУТАХ ПЕРЕВОЗКИ ДРЕВЕСИНЫ**

Лесозаготовительное производство с точки зрения логистики – сложная, динамичная и многоуровневая система, одной из ключевых и важнейших подсистем которой является подсистема перевозок. Важным аспектом в организации функционирования данной подсистемы является нахождение оптимального решения задачи маршрутизации, которое влияет на общие показатели эффективности логистической системы лесозаготовительного производства. Особую важность решение данной задачи приобретает в условиях ограничений по времени для принятия управленческих решений. Нередки случаи на практике, когда при оперативном управлении процессом перевозок пренебрегают нахождением оптимальных маршрутов по тем или иным критериям оптимальности либо при формировании графика работы сортиментовозов основываются на интуитивном подходе, что может привести к снижению основных показателей эффективности работы лесовозных транспортных средств на вывозке древесины.

В этой связи для изучения основных показателей работы сортиментовозов при перевозке древесины на различных маршрутах проведен численный эксперимент, в рамках которого нами осуществлено моделирование работы сортиментовоза при различных схемах перевозок. Для каждой из моделируемых схем работы было установлено четыре критерия объезда потребителей: от ближайшего к складу потребителя; от дальнего по расположению к складу потребителя; от первого по номеру потребителя; от первого по номеру потребителя, последовательно выполняя каждому потребителю по одному рейсу. Для каждой возможной ситуации были получены значения основных показателей работы сортиментовозов и проведена их оценка.

Ключевые слова: сортиментовоз, перевозка древесины, маршрут движения, коэффициент использования пробега, грузовая работа.

Для цитирования: Короленя Р. О., Барташевич Е. И. Основные результаты моделирования работы сортиментовоза на маршрутах перевозки древесины // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 134–142. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-16.

R. O. Korolenia, E. I. Bartashevich

Belarusian State Technological University

**THE MAIN RESULTS OF MODELING LOG TRUCK OPERATIONS
ON THE TIMBER TRANSPORTATION ROUTES**

In terms of logistics, the lumber industry is a complex, dynamic and multi-level system. One of the crucial subsystems of the lumber industry is the transport subsystem. An important dimension of the operation of this subsystem is to find the best solution to the routing problem. This solution effects the performance indicators of logistics system of the lumber industry. This task is particularly important when there is a time constraint on management decisions. In practice, it is frequent for operational transport management is neglected the search for optimal routes according to various optimality criteria or schedule timber trucks intuitively. It can lead to decline in the performance indicators of timber vehicles on a timber hauling.

In this connection, a numerical experiment was conducted for study the main performance indicators of log trucks when transporting timber on different routes. As part of the experiment, we simulated the operation of a log truck for various transport schemes. Four criteria for detouring consumers were established for each of the modelled schemes of operation: from the customer's nearest stock; from the furthest away in terms of location to the customer's stock; from the first numbered customer; from the first numbered customer, then consecutively, but performing one round trip for each customer. For each possible situation, the values of the main performance indicators of the log trucks were obtained and evaluated.

Keywords: log truck, timber transportation, traffic route, mileage utilization rate, freight work.

For citation: Korolenia R. O., Bartashevich E. I. The main results of modeling log truck operations on the timber transportation routes. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 134–142. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-16 (In Russian).

Введение. Сортиментная технология лесозаготовок позволяет осуществлять доставку круглых лесоматериалов непосредственно конечному потребителю («во двор потребителя»). Перевозка древесины потребителям при этом может осуществляться с использованием различных вариантов организации работы сортиментовозов на маршрутах [1–3]. Неравномерность во времени заготовки и потребления древесины, несовершенство планирования взаимодействия процессов перевозки и заготовки древесины зачастую вынуждают на практике организовывать работу лесовозных транспортных средств различными способами [4–6]. Так, например, определение пункта погрузки следующего рейса сортиментовоза может осуществляться «на ходу», т. е. в момент выполнения текущего рейса. Такой подход, без экономического обоснования и оптимизации, может приводить к снижению эффективности процесса перевозки.

В качестве одного из подходов оптимизации и решения данной проблемы можно использовать решение задачи маршрутизации [7].

Анализ литературных источников [2, 7–13] показывает, что решением подобных задач маршрутизации в различных постановках и с разными критериями оптимизации занимались многие ученые. Но в рассматриваемых литературных источниках не проводится сравнительный анализ выбора того или иного маршрута с точки зрения основных показателей работы лесовозных транспортных средств. Поэтому проведение исследования для количественной оценки последствий выбора работы сортиментовозов на различных маршрутах является актуальной задачей.

Основная часть. С целью определения основных показателей работы сортиментовозов при перевозке древесины на различных маршрутах ранее проводились подобные исследования [4–6]. Для постановки задачи и ее масштабирования было выполнено моделирование процесса перевозок древесины с использованием MS Excel и MathCad, включающее большое число корреспондирующих пунктов и определяемых показателей.

Основные показатели работы сортиментовозов определялись по методикам, изложенным в работах [14–16].

В настоящей работе осуществлено моделирование перевозок в производственных ситуациях по схемам 1–5.

Схема 1. На одном промежуточном складе С1 (рис. 1) имеется запас однородных сортиментов в объеме 625 м³. Древесину необходимо доставить на пять пунктов выгрузки у потребителей П1–П5 (рис. 1) с заданными потребностями. Перевозка осуществляется сортиментовозом с фактической грузоподъемностью 25 м³.

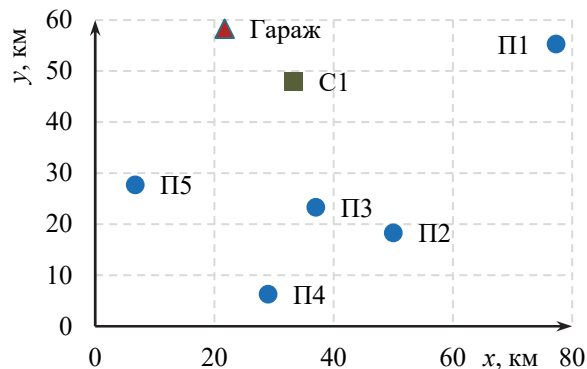


Рис. 1. Схема с одним промежуточным складом

Схема 2. Исходные данные те же, что и по схеме 1, но заявленный объем сортиментов сосредоточен на двух промежуточных складах С1, С2 (рис. 2). Причем на складе С1 сосредоточено 300 м³ древесины, на складе С2 – 325 м³.

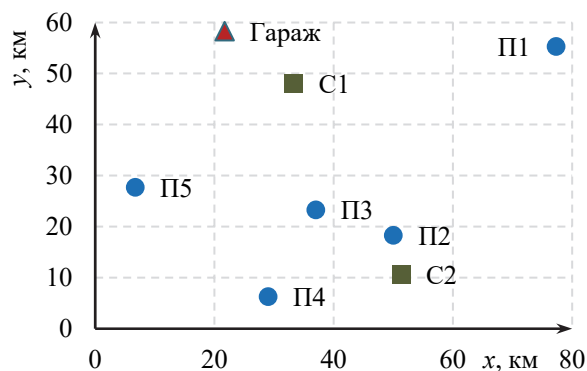


Рис. 2. Схема с двумя промежуточными складами

Схема 3. Исходные данные те же, что и по схеме 1, но заявленный объем сортиментов сосредоточен на трех промежуточных складах С1, С2, С3 (рис. 3). Запасы на складах: С1 – 225 м³; С2 – 200 м³; С3 – 200 м³ древесины.

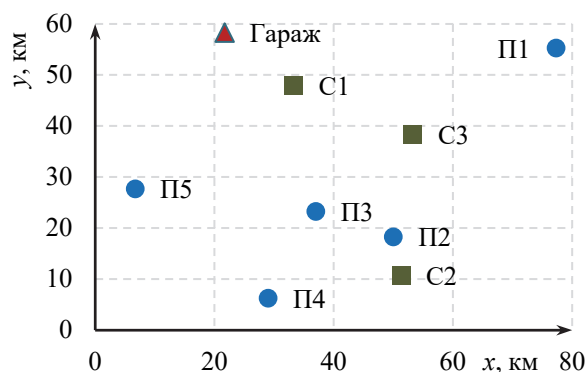


Рис. 3. Схема с тремя промежуточными складами

Схема 4. Условия те же, что и по схеме 1, но заявленный объем сортиментов сосредоточен на четырех складах (рис. 4): С1 – 175 м³; С2 – 150 м³; С3 – 150 м³; С4 – 150 м³.

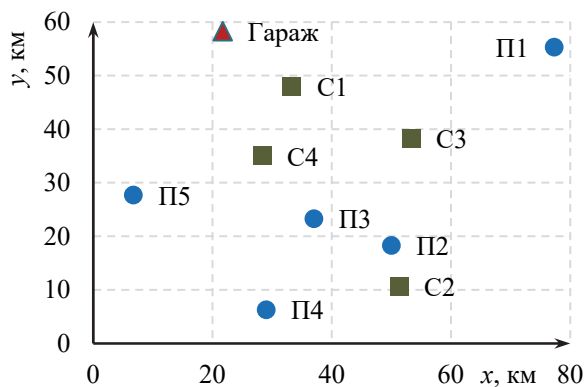


Рис. 4. Схема с четырьмя промежуточными складами

Схема 5. Условия те же, что и по схеме 1, но заявленный к перевозке объем сортиментов равномерно сосредоточен на пяти складах (рис. 5) – на каждом складе по 125 м³.

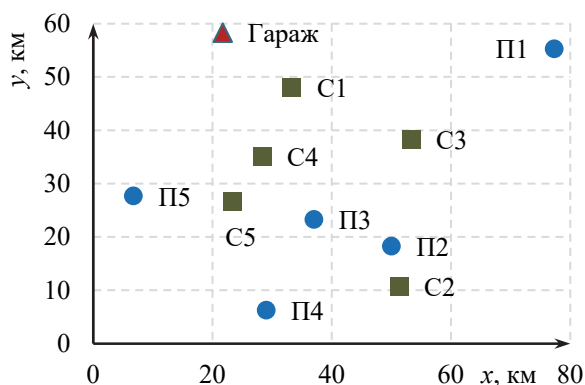


Рис. 5. Схема с пятью промежуточными складами

Необходимо отметить, что в качестве промежуточного склада может выступать любой поставщик древесины, в том числе отдельные лесосеки. Координаты всех корреспондирующих пунктов были выбраны произвольно.

Чтобы не потерять общности и упростить процесс моделирования, при решении поставлен-

ной задачи были использованы некоторые допущения и наложены следующие ограничения:

1) заявленный к перевозке объем древесины должен быть доставлен потребителям;

2) перевозки происходят непрерывно одним транспортным средством в составе тягача – сортиментовозом. Ограничений по срокам поставок нет;

3) удельная себестоимость транспортной работы принята равной: с грузом – 0,6 усл. ед./км·м³; без груза – 0,5 усл. ед./км;

4) основные показатели: грузовая работа, пройденный путь без груза, коэффициент использования пробега, затраты на перевозку;

5) назначение рейсов (последовательность объезда потребителей) каждой из моделируемых схем осуществлялось по следующим критериям:

– от ближайшего к складу потребителя;

– от дальнего по расположению к складу потребителя;

– от первого по номеру потребителя и далее последовательно (по номерам потребителей);

– от первого по номеру потребителя, последовательно выполняя каждому из них по одному рейсу;

6) потребности составляют: П1 – 125 м³; П2 – 100 м³; П3 – 150 м³; П4 – 75 м³; П5 – 175 м³;

7) координаты (рис. 1–5), км: C1 ($x = 33,3$; $y = 48,0$), C2 ($x = 51,3$; $y = 10,7$), C3 ($x = 53,3$; $y = 38,3$), C4 ($x = 28,3$; $y = 35,0$), C5 ($x = 23,3$; $y = 26,7$), П1 ($x = 77,3$; $y = 55,3$), П2 ($x = 50,0$; $y = 18,3$), П3 ($x = 37,0$; $y = 23,3$), П4 ($x = 29,0$; $y = 6,3$), П5 ($x = 6,7$; $y = 27,7$), гараж ($x = 21,7$; $y = 58,3$);

8) пунктом начала и окончания перевозки при моделировании всех схем является гараж.

На первом этапе моделирования процесса перевозки проведены расчеты основных показателей для каждой схемы и по каждому критерию назначения рейсов. Примеры расчета представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Расчет показателей работы сортиментовоза по схеме 1, критерий назначения рейсов – начиная от ближайшего к складу потребителя

Номер рейса	Пройденный путь, км				Перевезенный объем q , м ³	
	нулевой l_0	с грузом $l_{гр}$	без груза $l_{бгр}$	за рейс l_p		всего l
1	15,4	24,8	24,8	65,0	65,0	25,0
2	–	24,8	24,8	49,6	114,6	25,0
3	–	24,8	24,8	49,6	164,2	25,0
4	–	24,8	24,8	49,6	213,8	25,0
5	–	24,8	24,8	49,6	263,4	25,0
6	–	24,8	24,8	49,6	313,0	25,0
7	–	33,3	33,3	66,6	379,6	25,0
8	–	33,3	33,3	66,6	446,2	25,0
9	–	33,3	33,3	66,6	512,8	25,0
10	–	33,3	33,3	66,6	579,4	25,0

Окончание табл. 1

Номер рейса	Пройденный путь, км					Перевезенный объем q , м ³
	нулевой l_0	с грузом $l_{гр}$	без груза $l_{бгр}$	за рейс l_p	всего l	
11	–	33,3	33,3	66,6	646,0	25,0
12	–	33,3	33,3	66,6	712,6	25,0
13	–	33,3	33,3	66,6	779,2	25,0
14	–	37,3	37,3	74,6	853,8	25,0
15	–	37,3	37,3	74,6	928,4	25,0
16	–	37,3	37,3	74,6	1003,0	25,0
17	–	37,3	37,3	74,6	1077,6	25,0
18	–	42,1	42,1	84,2	1161,8	25,0
19	–	42,1	42,1	84,2	1246,0	25,0
20	–	42,1	42,1	84,2	1330,2	25,0
21	–	44,7	44,7	89,4	1419,6	25,0
22	–	44,7	44,7	89,4	1509,0	25,0
23	–	44,7	44,7	89,4	1598,4	25,0
24	–	44,7	44,7	89,4	1687,8	25,0
25	–	44,7	–	44,7	1732,5	25,0
26	55,7	–	–	55,7	1788,2	–

Таблица 2

**Расчет показателей работы сортиментовоза по схеме 1 (продолжение),
критерий назначения рейсов – начиная от ближайшего к складу потребителя**

Номер рейса	Затраты на рейс, усл. ед.				Коэффициент использования пробега β	Грузовая работа, м ³ ·км	
	с грузом $c_{гр}$	без груза $c_{бгр}$	рейс c_p	всего c		за рейс r_p	всего r
1	372,0	20,10	392,10	392,10	0,382	620,0	620,0
2	372,0	12,40	384,40	776,50	0,500	620,0	1240,0
3	372,0	12,40	384,40	1160,90	0,500	620,0	1860,0
4	372,0	12,40	384,40	1545,30	0,500	620,0	2480,0
5	372,0	12,40	384,40	1929,70	0,500	620,0	3100,0
6	372,0	12,40	384,40	2314,10	0,500	620,0	3720,0
7	499,5	16,65	516,15	2830,25	0,500	832,5	4552,5
8	499,5	16,65	516,15	3346,40	0,500	832,5	5385,0
9	499,5	16,65	516,15	3862,55	0,500	832,5	6217,5
10	499,5	16,65	516,15	4378,70	0,500	832,5	7050,0
11	499,5	16,65	516,15	4894,85	0,500	832,5	7882,5
12	499,5	16,65	516,15	5411,00	0,500	832,5	8715,0
13	499,5	16,65	516,15	5927,15	0,500	832,5	9547,5
14	559,5	18,65	578,15	6505,30	0,500	932,5	10 480,0
15	559,5	18,65	578,15	7083,45	0,500	932,5	11 412,5
16	559,5	18,65	578,15	7661,60	0,500	932,5	12 345,0
17	559,5	18,65	578,15	8239,75	0,500	932,5	13 277,5
18	631,5	21,05	652,55	8892,30	0,500	1052,5	14 330,0
19	631,5	21,05	652,55	9544,85	0,500	1052,5	15 382,5
20	631,5	21,05	652,55	10 197,40	0,500	1052,5	16 435,0
21	670,5	22,35	692,85	10 890,25	0,500	1117,5	17 552,5
22	670,5	22,35	692,85	11 583,10	0,500	1117,5	18 670,0
23	670,5	22,35	692,85	12 275,95	0,500	1117,5	19 787,5
24	670,5	22,35	692,85	12 968,80	0,500	1117,5	20 905,0
25	670,5	0	670,50	13 639,30	–	1117,5	22 022,5
26	–	27,85	27,85	13 667,15	–	–	–

Для каждой моделируемой ситуации были построены схемы грузопотоков, пример одной из них представлен на рис. 6.

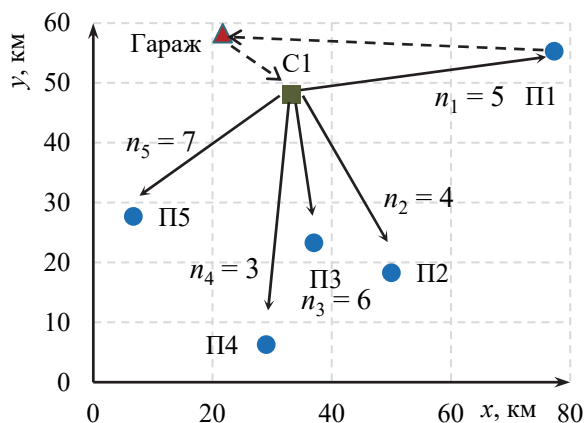


Рис. 6. Схема грузопотоков при работе с одним складом:

← - - - нулевой пробег; ← — пробег с грузом
 n_i — количество рейсов; i — номер i -го потребителя

В завершении данного этапа моделирования было получено 20 таблиц данных, аналогичных табл. 1 и табл. 2, а также 20 схем грузопотоков.

На следующем этапе моделирования осуществлялась выборка данных из полученных на предыдущем этапе таблиц.

Интерес представляли следующие показатели:

– суммарные значения: нулевого пробега l_0 ; пробега с грузом $l_{гр}$; пробега без груза $l_{бгр}$; пройденного пути всего l ; перевозимого объема q ; затрат на рейс с грузом $c_{гр}$; затрат на рейс без груза $c_{бгр}$; грузовой работы за рейс r_p ;

– средние значения: пробега с грузом $l_{гр}$; пробега без груза $l_{бгр}$; пробега за рейс l_p ; перевезенного объема q ; затрат на рейс с грузом $c_{гр}$; затрат на рейс без груза $c_{бгр}$; затрат на рейс c_p ; коэффициента использования пробега β ; грузовой работы за рейс r_p ; всего грузовой работы r ; общего коэффициента использования пробега по схеме $\beta_{общ}$.

Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Суммарные и средние значения показателей

Критерий	1		2		3		4	
	Суммарные	Средние	Суммарные	Средние	Суммарные	Средние	Суммарные	Средние
Схема 1								
l_0	71,1	–	30,8	–	30,8	–	30,8	–
$l_{гр}$	880,9	35,2	880,9	35,2	880,9	35,2	880,9	35,2
$l_{бгр}$	836,2	34,8	880,9	35,2	880,9	35,2	880,9	35,2
l_p	–	68,8	–	68,9	–	68,9	–	68,9
l	1788,2	–	1792,6	–	1792,6	–	1792,6	–
q	625,0	25,0	625,0	25,0	625,0	25,0	625,0	25,0
$c_{гр}$	13 213,5	528,5	13 213,5	528,5	13 213,5	528,5	13 213,5	528,5
$c_{бгр}$	425,8	17,4	448,15	17,5	448,15	17,5	448,15	17,5
c_p	–	525,7	–	525,7	–	525,7	–	525,7
c	–	–	–	–	–	–	–	–
β	–	0,5	–	0,5	–	0,5	–	0,5
r_p	22 022,5	880,9	22 022,5	880,9	22 022,5	880,9	22 022,5	880,9
r	–	10 198,8	0	12 704,6	0	11 978,6	–	11 806,7
$\beta_{общ}$	–	0,474	–	0,483	–	0,483	–	0,483
Схема 2								
l_0	71,1	–	64,4	–	54,7	–	54,7	–
$l_{гр}$	753,6	30,1	773,9	31,0	906,6	36,3	896,3	35,9
$l_{бгр}$	716,5	28,7	780,5	31,2	853,1	34,1	819,1	32,8
l_p	–	59,3	–	62,3	–	69,8	–	68,1
l	1541,2	–	1618,8	–	1814,4	–	1770,1	–
q	625,0	25,0	625,0	25,0	625,0	25,0	625,0	25,0
$c_{гр}$	11 304,0	452,2	11 608,5	464,3	13 599,0	544	13 444,5	537,8
$c_{бгр}$	365,95	15,1	397,95	16,2	434,25	17,5	417,25	16,8
c_p	–	449,9	–	462,7	–	540,5	–	533,9
c	–	–	–	–	–	–	–	–
β	–	0,5	–	0,5	–	0,5	–	0,5
r_p	18 840,0	753,6	19 347,5	773,9	22 665,0	906,6	22 407,5	896,3

Окончание табл. 3

Критерий	1		2		3		4	
	Суммарные	Средние	Суммарные	Средние	Суммарные	Средние	Суммарные	Средние
r	–	8608,4	–	12 273,2	–	11 648,5	–	11 618,8
$\beta_{\text{общ}}$	–	0,467	–	0,460	–	0,485	–	0,491
Схема 3								
l_0	54,7	–	64,4	–	54,7	–	54,7	–
$l_{\text{гр}}$	721,6	28,9	905	36,2	907,6	36,3	870,5	34,8
$l_{\text{бгр}}$	680,7	27,2	856,7	34,3	848,2	33,9	815	32,6
l_p	–	56	–	70,2	0	69,6	–	66,9
l	1457	–	1826,1	–	1810,5	–	1740,2	–
q	625,0	25,0	625,0	25,0	625,0	25,0	625,0	25,0
$c_{\text{гр}}$	10 824,0	433	13 575,0	543	13 614,0	544,6	13 057,5	522,3
$c_{\text{бгр}}$	348,05	14,1	436,05	17,7	431,8	17,4	415,2	16,7
c_p	–	430,5	–	539,8	–	541	–	518,9
c	–	–	–	–	–	–	–	–
β	–	0,5	–	0,5	–	0,5	–	0,5
r_p	18 040,0	721,6	22 625,0	905	22 690,0	907,6	21 762,5	870,5
r	–	8567,9	–	13 442,8	–	11 538,9	–	11 436,0
$\beta_{\text{общ}}$	–	0,477	–	0,479	–	0,487	–	0,485
Схема 4								
l_0	54,7	–	53,4	–	54,7	–	54,7	–
$l_{\text{гр}}$	580,8	23,2	902,0	36,1	756,0	30,2	748,1	29,9
$l_{\text{бгр}}$	579,2	23,2	861,6	34,5	674,5	27	672,2	26,9
l_p	–	46,7	–	69,9	–	57,1	–	56,7
l	1214,7	–	1817,0	–	1485,2	–	1475,0	–
q	625,0	25,0	625,0	25,0	625,0	25,0	625,0	25,0
$c_{\text{гр}}$	8712,0	348,5	13 530,0	541,2	11 340,0	453,6	11 221,5	448,9
$c_{\text{бгр}}$	297,3	12,2	438,5	17,6	344,95	14,0	343,8	14,0
c_p	–	347,3	–	538,0	–	450,2	–	445,6
c	–	–	–	–	–	–	–	–
β	–	0,5	–	0,5	–	0,5	–	0,5
r_p	14 520,0	580,8	22 550,0	902,0	18 900,0	756,0	18 702,5	748,1
r	–	7341,4	–	13 479,6	–	10 668,7	–	10 777,6
$\beta_{\text{общ}}$	–	0,458	–	0,482	–	0,491	–	0,489
Схема 5								
l_0	67,7	–	53,4	–	54,7	–	54,7	–
$l_{\text{гр}}$	530,8	21,2	871,0	34,8	589,7	23,6	737,5	29,5
$l_{\text{бгр}}$	523,6	20,9	852,0	34,1	569,5	22,8	718,2	28,7
l_p	–	43,2	–	68,3	–	46,7	–	58,1
l	1122,1	–	1776,4	–	1213,9	–	1510,4	–
q	625,0	25,0	625,0	25,0	625,0	25,0	625,0	25,0
$c_{\text{гр}}$	7962,0	318,5	13 065,0	522,6	8845,5	353,8	11 062,5	442,5
$c_{\text{бгр}}$	269,5	11,4	433,7	17,4	292,45	12,0	366,8	14,9
c_p	–	317,6	–	519,9	–	352,2	–	440,3
c	–	–	–	–	–	–	–	–
β	–	0,5	–	0,5	–	0,5	–	0,5
r_p	13 270,0	530,8	21 775,0	871,0	14 742,5	589,7	18 437,5	737,5
r	–	6847,9	–	13 496,3	–	8675,2	–	10 481,7
$\beta_{\text{общ}}$	–	0,446	–	0,476	–	0,465	–	0,471

На третьем этапе моделирования были определены показатели: пройденный путь без груза, затраты на перевозку, грузовая работа –

минимальные значения; коэффициент использования пробега – максимальные значения. Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Анализ основных показателей моделирования

Номер критерия	Пройденный путь без груза, км	Затраты на перевозку, усл. ед.	Коэффициент использования пробега (общий)	Грузовая работа, м ³ ·км
Схема 1				
1	34,8	13 667,15	0,474	10 198,8
2	35,2	13 669,35	0,483	12 704,6
3	35,2	13 669,35	0,483	11 978,6
4	35,2	13 669,35	0,483	11 806,7
Схема 2				
1	30,1	11 697,80	0,467	721,6
2	31,0	12 030,95	0,460	773,9
3	36,3	14 052,90	0,485	906,6
4	35,9	13 881,40	0,491	896,3
Схема 3				
1	28,9	11 191,70	0,477	721,6
2	36,2	14 035,55	0,479	905,0
3	36,3	14 065,45	0,487	907,6
4	34,8	13 492,35	0,485	870,5
Схема 4				
1	23,2	9028,95	0,458	580,8
2	36,1	13 987,50	0,482	902,0
3	30,2	11 704,60	0,491	756,0
4	29,9	11 584,95	0,489	748,1
Схема 5				
1	21,2	8257,65	0,446	530,8
2	34,8	13 517,70	0,476	871,0
3	23,6	9157,60	0,465	589,7
4	29,5	11 448,95	0,471	737,5

Из значений показателей в табл. 4 можно сделать следующие основные выводы.

Если в качестве оценки оптимальности выступает минимальное значение пройденного пути без груза, то для всех рассмотренных случаев оптимальным является назначение рейсов, начиная от ближайшего к складу потребителя. Аналогично, если для оценки оптимальности выступает минимум общих затрат на перевозку заданного объема сортиментов, тогда оптимальным является назначение рейсов начиная от ближайшего к складу.

По значениям минимальной величины грузовой работы оптимальным является назначение рейсов начиная от ближайшего к складу потребителя.

По показателю максимального значения коэффициента использования пробега ситуация неоднозначная и для каждой схемы выбор способа назначения рейсов меняется. Это, видимо, во многом определяется соотношением расстояний между корреспондирующими пунктами и требует отдельного дальнейшего изучения и проработки.

Заключение. Проводя анализ полученных результатов моделирования, а также литературных источников, на наш взгляд, следует отметить следующие.

Полученные в ходе моделирования процесса перевозки древесины показатели для различных вариантов организации работы на маршрутах, показывают динамику изменения изучаемых показателей.

Установлено, что формирование маршрутов работы сортиментовозов по различным критериям назначения рейсов в рамках моделируемой системы может приводить к увеличению транспортных затрат. Для моделируемой схемы 1 увеличение составляет до 1%; для схемы 2 – до 20%; для схемы 3 – до 26%; для схемы 4 – до 55%; для схемы 5 – до 64%.

Полученные результаты свидетельствуют также о том, что при увеличении пунктов погрузки от 1 до 5, появляется большая вариативность способов формирования маршрутов работы сортиментовозов, что, в свою очередь, усложняет задачу эффективного оперативного управления перевозками лесозаготовительного производства.

Список литературы

1. Короленя Р. О. Определение функции срочности перевозки древесины по основным схемам организации транспортного процесса // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообработ. пром-сть. С. 83–85.
2. Ковалев Р. Н., Демидов Д. В., Боярский С. Н. Логистическое управление транспортными системами: учеб. пособие. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2008. 166 с.
3. Короленя Р. О., Гриневич К. А. Транспортировка древесины сортиментовозами: граф состояний // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 86-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 31 янв. – 12 февр. 2022 г. Минск, 2022. С. 141–144.
4. Короленя Р. О. Совершенствование подходов к выбору маршрутов перевозки // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 апр. 2017 г. Минск, 2017. С. 149–151.
5. Короленя Р. О. Моделирование работы сортиментовозов при транспортировке древесины: граф состояний // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2022. № 1 (252). С. 129–135. DOI: 10.52065/2519-402X-2022-252-1-129-135.
6. Короленя Р. О., Барташевич Е. И. Изучение основных показателей работы сортиментовозов на различных маршрутах перевозки древесины // Состояние и перспективы развития лесного комплекса в странах СНГ: сб. ст. II Междунар. науч.-техн. конф. (Междунар. молодежный форум по лесопром. образованию «Лес-Наука-Инновации-2022»), Минск, 6–9 дек. 2022 г. Минск, 2022. С. 51–55.
7. Родионов Ю. В., Подшивалова К. С., Подшивалов С. Ф. Маршрутизация маятниковых и кольцевых маршрутов между несколькими базами снабжения // Вестн. Таджик. техн. ун-та. 2012. № 1 (17). С. 79.
8. Васюткин А. В. Задача маршрутизации транспортных средств // Инновационная наука. 2017. № 5. С. 9–11.
9. Камбаров Ч. У. Алгоритм расчета работы перевозок грузов автомобилями на маятниковом маршруте // Инженер. 2015. № 10. С. 135–138.
10. Кабикенов С. Ж., Шалаев В. В., Сунгатоллакызы А. Планирование перевозок однородных грузов с компьютерной оптимизацией маятниковых и кольцевых маршрутов // Труды университета. 2021. № 2 (83). С. 124–131. DOI: 10.52209/1609-1825_2021_2_124.
11. Конотопский В. Ю. Элементы методики построения кольцевых маршрутов в сфере производственной логистики // Вестн. Томского гос. ун-та. Экономика. 2012. № 4 (20). С. 98–104.
12. Козулин Н. А. Поиск оптимального маршрута транспортировки древесины // Технологии 2022: основные проблемы и направления развития: сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 30 июня 2022 г. Пенза, 2022. С. 150–152.
13. Vlasov A. V., Stanovskih A. A. Additional constraints in the vehicle routing problem // Universum: технические науки. 2022. № 4-12 (97). P. 49–55. DOI: 10.32743/UniTech.2022.97.4.13513.
14. Ванчукевич В. Ф., Седюкевич В. Н., Холупов В. С. Грузовые автомобильные перевозки. Минск: Выш. шк., 1989. 272 с.
15. Ванчукевич В. Ф., Седюкевич В. Н., Холупов В. С. Автомобильные перевозки. Минск: ДизайнПро, 1999. 224 с.
16. Воркут А. И. Грузовые автомобильные перевозки. Киев: Вища школа. 1986. 447 с.

References

1. Korolenia R. O. Determining the urgency function of timber transport by the main transport process organisation schemes. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 83–85 (In Russian).
2. Kovalev R. N., Demidov D. V., Boyarskiy S. N. *Logisticheskoye upravleniye transportnymi sistemami* [Logistics management of transport systems]. Ekaterinburg, Ural'skiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskiiy universitet Publ., 2008. 166 p. (In Russian).
3. Korolenya R. O., Grinevich K. A. Timber transportation by log trucks: graph of states. *Lesnaya inzheneriya, materialovedeniye i dizayn: materialy 86-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Forest Engineering, Materials Science and Design: Proceedings of the 86th Scientific and Technical Conference of Faculty, Researchers and PhD Students (with international participation)]. Minsk, 2022, pp. 141–144 (In Russian).
4. Korolenya R. O. Improvement of approaches to the selection of timber transportation routes. *Lesozagotovitel'noye proizvodstvo: problemy i resheniya: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy*

konferentsii [Logging Production: Problems and Solutions: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Minsk, 2017, pp. 149–151 (In Russian).

5. Korolenya R. O. Modelling the operation of log trucks during timber transport: the status graph. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forestry. Nature Management. Recycling of Renewable Resources, 2022, no. 1 (252), pp. 129–135. DOI: 10.52065/2519-402X-2022-252-1-129-135 (In Russian).

6. Korolenya R. O., Bartashevich E. I. Studying the main performance indicators of timber trucks on different timber transportation routes. *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya lesnogo kompleksa v stranakh SNG: sbornik statey II Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Mezhdunarodnyy molodezhnyy forum po lesopromyshlennomu obrazovaniyu “Les-Nauka-Innovatsii-2022”)*. [State and prospects for the development of the forestry complex in the CIS countries: Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference (the International Youth Forum on Forestry Education “Forest-Science-Innovation-2022”)]. Minsk, 2022, pp. 51–55 (In Russian).

7. Rodionov Yu. V., Podshivalova K. S., Podshivalov S. F. Routing of pendulum and ring routes between several supply bases. *Vestnik Tadzhiikskogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tajik Technical University], 2012, no. 1 (17), p. 79 (In Russian).

8. Vasyutkin A. V. The task of routing vehicles. *Innovatsionnaya nauka* [Innovative science], 2017, no. 5, pp. 9–11 (In Russian).

9. Kambarov Ch. U. Algorithm for calculating the work of transporting goods by car on a pendulum route. *Inzhener* [Engineer], 2015, no. 10, pp. 135–138 (In Russian).

10. Kabikenov S. Zh., Shalayev V. V., Sungatollakzy A. Homogeneous goods transport planning with computer-optimised pendulum and roundabout routing. *Trudy universiteta* [Proceedings of the University], 2021, no. 2 (83), pp. 124–131. DOI: 10.52209/1609-1825_2021_2_124 (In Russian).

11. Konotopskiy V. Yu. Elements of a production logistics ring route methodology. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika* [Bulletin of Tomsk State University. Economy], 2012, no. 4 (20), pp. 98–104 (In Russian).

12. Kozulin N. A. Finding The best timber transportation route. *Tekhnologii 2022: osnovnyye problemy i napravleniya razvitiya: sbornik statey II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Technologies 2022: main problems and directions of development: Collection of articles of the II International Scientific and Practical Conference]. Penza, 2022, pp. 150–152 (In Russian).

13. Vlasov A. V., Stanovskih A. A. Additional constraints in the vehicle routing problem. *Universum: tekhnicheskiye nauki* [Universum: technical sciences], 2022, no. 4-12 (97), pp. 49–55. DOI: 10.32743/UniTech.2022.97.4.13513.

14. Vanchukevich V. F., Sedyukevich V. N., Holupov V. S. *Gruzovyye avtomobil'nyye perezozki* [Freight road transportation]. Minsk, Vysheyschaya shkola Publ., 1989. 272 p. (In Russian).

15. Vanchukevich V. F., Sedyukevich V. N., Holupov V. S. *Avtomobil'nyye perezozki* [Road transportation]. Minsk, DizaynPro Publ., 1999. 224 p. (In Russian).

16. Vorkut A. I. *Gruzovyye avtomobil'nyye perezozki* [Freight road transportation]. Kyiv, Vishcha shkola Publ., 1986. 447 p. (In Russian).

Информация об авторах

Короленя Руслан Олегович – доцент кафедры информатики и веб-дизайна. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: korolenia@belstu.by

Барташевич Елизавета Игоревна – студентка. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: elizavetta358bart@gmail.com

Information about the authors

Korolenia Ruslan Olegovich – Assistant Professor, the Department of Informatics and Web-Design. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: korolenia@belstu.by

Bartashevich Elizaveta Igorevna – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: elizavetta358bart@gmail.com

Поступила 20.03.2023

ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ WOODWORKING INDUSTRY

УДК 625.172:625.142.21

В. В. Романенко¹, А. Б. Невзорова²

¹Белорусский государственный университет транспорта

²Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОСТАВНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ШПАЛ

Все виды деревянного подрельсового основания для Белорусской железной дороги выпускаются ОАО «Борисовский шпалопропиточный завод» и выполняются в виде шпал, переводных брусьев, мостовых брусьев и т. д. Анализ производственного процесса показал наличие остатков брусьев длиной менее 2,75 м, которые не могут быть использованы для изготовления шпал. Подобные остатки длиной от 0,25 до 0,50 м получают после выпиливания из пиловочного бревна длиной 5,50 м переводных брусьев, длина которых изменяется от 3,00 до 5,50 м с шагом 0,25 м.

Цель настоящей работы состоит в оценке перспективности применения деревянных брусьев различной длины, оставшихся после выпиливания переводных брусьев, для разработки ресурсосберегающей технологии, характеризующейся снижением материалоемкости и энергоемкости продукции. Показано, что одним из вариантов такой технологии может стать изготовление составных шпал из двух либо трех частей, соединенных между собой различными способами, от которых зависит надежная работа конструкции. К тому же возможно внедрение дополнительных технологий, например изготовление нагелей, болтов, винтов и т. д. Предложенная ресурсосберегающая технологическая схема изготовления составной шпалы, которая позволяет реализовать остатки пиловочного бревна, способна существенно снизить непроизводительные расходы предприятия и сохранить сырьевые ресурсы – деловую древесину.

Ключевые слова: ресурсосбережение, технология, конструктивная схема, составная деревянная шпала, переводной брус, сращивание, соединение.

Для цитирования: Романенко В. В., Невзорова А. Б. Ресурсосберегающая технология изготовления составных деревянных шпал // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 143–151. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-17.

V. V. Romanenko¹, A. B. Neuzorava²

¹Belarusian State University of Transport

²Sukhoi State Technical University of Gomel

RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING COMPOSITE WOODEN SLEEPERS

All types of wooden sub-rail base for the Belarusian railway are manufactured by Borisov sleeper impregnation Plant and are made in the form of sleepers, transfer bars, bridge bars, etc. The analysis of the production process showed the presence of the remaining bars with a length of less than 2.75, which cannot be used for the manufacture of sleepers. Similar residues with a length of 0.25 to 0.50 m are obtained after sawing out of a 5.50 m long saw log of transfer bars, the length of which varies from 2.75 to 5.50 m in increments of 0.25 m.

The purpose of this work is to assess the prospects for the use of wooden beams of various lengths remaining after sawing the transfer bars, for the development of a resource-saving technology for the manufacture of composite sleepers, characterized by a decrease in material and energy consumption of products. It is shown that one of the options for the rational use of residues can be the manufacture of composite sleepers from two or three parts interconnected in various ways, on which the reliable operation of the structure depends, and the need to introduce additional technologies, for example, for the manufacture of bolts, screws, etc. A resource-saving technological scheme for the manufacture of composite sleepers is proposed, which allows reducing unproductive expenses of the enterprise and raw materials – business wood.

Keywords: resource saving, technology, structural scheme, composite wooden sleeper, transfer beam, splicing, connection.

For citation: Romanenko V. V., Neuzorava A. B. Resource-saving technology for manufacturing composite wooden sleepers. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 143–151. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-17 (In Russian).

Введение. Основная цель работы железно-дорожного транспорта – обеспечение безопасного пропускания поездов, который во многом зависит от содержания верхнего строения пути (ВСП). В состав ВСП входят рельсы, подрельсовое основание, скрепления и балласт.

Каждый из элементов ВСП имеет свое назначение и должен отвечать определенным требованиям, зависящим от вида железнодорожного пути (общего и необщего пользования), грузонапряженности, скоростей движения поездов, плана линии, параметров кривых и т. п.

Обеспечение стабильного геометрического положения рельсовых нитей, образующих рельсовую колею, в значительной степени зависит от вида и состояния подрельсового основания. Подрельсовое основание выполняется в виде шпал (для путей), переводных брусьев (для стрелочных переводов), мостовых брусьев (для мостов с ездой на балласте) и т. д.

На белорусской железной дороге (БЖД) в качестве подрельсового основания используют деревянные либо железобетонные шпалы. Сферы применения каждого вида зависят от различных факторов и определяют положительные и отрицательные стороны их эксплуатации [1–3].

Все деревянные элементы ВСП для нужд БЖД выпускаются ОАО «Борисовский шпало-пропиточный завод» (БШПЗ), в частности – пропитанные деревянные шпалы и брусья для широкой и узкой рельсовой колеи.

При производстве деревянных шпал реализуется следующий процесс: из пиловочного бревна выпиливается шпалопродукция, которая в течение нескольких месяцев высушивается до определенной влажности, проходит механическую обработку в наколочном комплексе, подвергается обработке методом «вакуум – давление – вакуум», что позволяет обеспечить равномерную пропитку антисептиком всей поверхности шпалы [4–6].

Как правило, шпалы и переводные брусья нарезают из пиловочного бревна ствола сосны диаметром 28–40 см и длиной порядка 5,50 м. Длина стандартной шпалы для двухниточной колеи составляет 2,75 м, таким образом, из бревна можно изготовить две шпалы используя это бревно полностью либо с незначительным остатком. Переводные брусья имеют различную длину от 3,0 до 5,50 м, после их нарезки образуются остатки бруса максимальной длины

2,50 м, которые, в свою очередь, не могут быть применены для изготовления шпал.

С учетом количества стрелочных переводов, эксплуатируемых на деревянном основании, и комплектов переводных брусьев, изготавливаемых БШПЗ, ежегодные объемы остатков брусьев длиной менее 2,75 м весьма значительны. Ввиду существующей и перспективной потребности БЖД в деревянном основании, применение таких остатков для изготовления подрельсового основания сможет снизить потребность в древесине, пригодной для изготовления шпал.

В настоящее время на БЖД применяются цельнобрусковые деревянные шпалы, однако вследствие экономии древесины постоянно разрабатываются конструкции составных шпал, в том числе и клееных [7, 8].

Разработанные на сегодняшний день конструкции составных шпал предполагают применение элементов в виде накладок, шурупов, винтов, специально разработанных крепежей либо клея. Такие конструкции требуют внедрения дополнительных технологий, что с одной стороны экономит объемы древесины, а с другой – увеличивает себестоимость продукции.

Цель настоящей работы состоит в оценке перспективности применения деревянных брусьев различной длины, оставшихся после выпиливания переводных брусьев, для разработки ресурсосберегающей технологии изготовления составных шпал, характеризующейся снижением материалоемкости и энергоемкости продукции.

Основная часть. Несмотря на повсеместное распространение на БЖД железнодорожных путей на железобетонном основании, порядка половины стрелочных переводов (2,9 тыс. – 45% от общего количества) эксплуатируются на деревянных брусьях. На станционных путях и путях необщего пользования эта доля значительно больше (до 70%), кроме того, ряд путей необщего пользования внутризаводских площадей с деревянным основанием обслуживается не БЖД, а самими предприятиями.

Ежегодно стрелочные переводы, выработавшие свой ресурс, заменяются новыми на железобетонном либо деревянном основании, а также производится замена только комплектов деревянных переводных брусьев (рис. 1) [9].

Основные марки стрелочных переводов (1/9 и 1/11) имеют различие в длине и, соответ-

ственно, в количестве переводных брусьев (размером 3,0 м и более), а именно:

- марки 1/11 с рельсами типа Р65 – 80 шт.;
- 1/9 с Р65 – 68 шт.;
- 1/11 с Р50 – 75 шт.;
- 1/9 с Р50 – 63 шт.

Комплект включает шпалы длиной 2,75 м и брусья длиной от 3,0 до 5,50 м с шагом 0,25 м. Количество брусьев определенного размера зависит от месторасположения их на стрелочном переводе (стрелка, зона соединительных путей, крестовина) и проекта [10].

Согласно схеме одиночного обыкновенного стрелочного перевода по мере увеличения ширины его сечения увеличивается и длина переводных брусьев, таким образом в зоне стрелки располагаются самые короткие брусья, а в зоне крестовины (закрестовинной зоне) самые длинные.

При вырезке переводных брусьев с пиловочного бревна длиной 5,50 м остаются куски брусьев разных размеров – от 2,50 до 0,25 м с шагом 0,25 м. Количество остатков брусьев с разным размером зависит от марки стрелочного перевода и типа рельсов (таблица).



Рис. 1. Объемы укладки деревянных шпал и переводных брусьев на БЖД

Определение объема остатков брусьев различной длины после вырезки переводных брусьев

Длина переводного бруса, м	Количество переводных брусьев, шт., в зависимости от марки и типа стрелочного перевода					Расчетная длина бруса после вырезки (остаток), м	Объем остатков расчетной длины, %	Объем остатков длиной больше расчетной	
	1/11, Р65	1/9, Р65	1/11, Р50	1/9, Р50	среднее			%	шт.
3,00	16	17	16	17	16,5	2,50	23,2	23,2	16,5
3,25	10	10	8	7	8,75	2,25	12,3	35,5	25,25
3,50	8	8	7	7	7,5	2,00	10,6	46,1	32,75
3,75	7	4	8	5	6,0	1,75	8,4	54,5	38,75
4,00	5	6	4	3	4,5	1,50	6,3	60,8	43,25
4,25	6	5	5	4	5,0	1,25	7,0	67,8	48,25
4,50	7	6	7	7	6,75	1,00	9,6	77,4	55
4,75	6	4	5	4	4,75	0,75	6,7	84,1	59,75
5,00	5	4	5	5	4,75	0,50	6,7	90,8	64,5
5,25	6	4	5	4	4,75	0,25	6,7	97,5	69,25
5,50	4	0	3	0	1,75	0	2,5	100	71
Итого	80	68	73	63	71	–	100	–	–

Как видно из расчетов, более двух третей остатков (77,4%) имеют размеры 1,0 м и более – 55 шт. в среднем с одного стрелочного перевода. Практически половина остатков (46,1%) имеет длину 2,0 м и более. В период с 2015 по 2021 г. (см. рис. 1) в среднем на БЖД поставлялось порядка 490 комплектов деревянных брусьев, применительно к расчетам из таблицы это означает,

что объем остатков брусьев длиной 1,00 м и более – порядка 26 тыс. шт.

Брусья длиной менее 1,0 м (0,75, 0,50 и 0,25 м) составляют третью часть от общего количества брусьев, но ввиду малой длины для применения в составных шпалах не подходят, так как шпалы будут иметь три и более соединений.

Составные деревянные шпалы предназначаются для укладки в малодеятельные стационарные пути и в пути необщего пользования, обслуживаемые как дистанциями пути БЖД, так и промышленными предприятиями. Подобные виды железнодорожных путей характеризуются отсутствием обращения по ним пассажирских поездов, а также ограниченными скоростями грузовых поездов и невысокой грузонапряженностью.

Составные шпалы, как правило, представляют собой конструкцию, состоящую из нескольких брусков, соединенных между собой крепежными элементами либо клеем, например:

- два-три бруса соединяются между собой по горизонтальной плоскости и скрепляются при помощи металлических болтов [11] либо круглых деревянных стержней, имеющих на концах левую и правую резьбу [12];

- вместо болтов и стержней используются перевязки в виде полимерных либо углеродных нитей, они скрепляют брусья по горизонтальной плоскости в четырех местах на противоположных торцах шпал для предохранения от растрескивания и в местах установки рельсов [13];

- составная шпала представляет собой пакет брусьев, состоящий из двух брусьев одинаковой длины 2,75 м (верхний и нижний слой) и трех составных общей длиной также 2,75 м (средний слой), между которыми расположены металлические закладные связующие элементы, изготовленные из стального листа либо сетки, дополнительно весь пакет соединен винтами из прочных сортов древесины [14];

- для увеличения срока службы деревянной шпалы разработана конструкция, представляющая герметичный пластиковый корпус, заполненный плотно прилегающим к стенкам корпуса деревянным брусом прямоугольного сечения [15].

Все перечисленные решения предполагают использование бруса различного поперечного сечения, но имеющего длину стандартной шпалы 2,75 м, что не соответствует решению задачи об использовании бруса 2,50 м и менее. Кроме того, применение корпусов, болтов, стержней, перевязок и т. п. предполагает разработку и внедрение технологий по их изготовлению, что может значительно повысить стоимость продукции.

Чтобы избежать удорожания шпалы и минимизировать внедрение дополнительных технологий, необходимо разработать технологические схемы, предполагающие соединения по возможности без дополнительных крепежных деталей и с максимальным использованием имеющихся после обрезки брусьев.

Увеличение длины брусьев, работающих в горизонтальном положении, называется сращиванием. При этом брусья стыкуются друг с другом торцами, отрезанными под прямым углом,

либо торцами, отрезанными на угол. В месте сращивания концы брусьев могут накладываться друг на друга и соединяться нагелями, гвоздями и т. п., при этом в узле сращивания может быть зацепление [16].

При разработке технологических схем составных шпал кроме длины остатков брусьев необходимо учесть условия работы шпал, места приложения нагрузки и конструктивные особенности других элементов ВСП (рис. 2) [17].

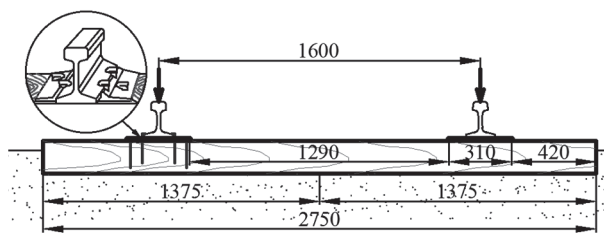


Рис. 2. Расчетная схема для определения возможных сечений для сращивания

Сращивание брусьев выполняется на опоре, расположенной по всей длине конструкции либо, по крайней мере, под узлом соединения. В качестве опоры в данном случае выступает балластная призма, которая должна обеспечивать равноупругость основания шпалы [18].

Из соединений, препятствующих разъезжанию обеих частей и не требующих применения крепежных деталей, можно рассмотреть сращивание впритык сквозным сквороднем («ласточкин хвост»). Оно является одним из самых прочных, образующих замок шип-паз. Паз имеет трапециевидную форму, которая и препятствует разъезжанию частей, шип повторяет форму паза.

Исходя из длин брусьев и возможных мест расположения сращивания (исключая область под металлической подкладкой) рассмотрены два варианта конструкции:

- с одним соединением по середине шпалы (рис. 3);

- с двумя соединениями в подрельсовой зоне (рис. 4, 5).

Размер шипа зависит от толщины и ширины бруса, а именно: широкая и узкая стороны шипа должны составлять соответственно $3/5$ и $2/5$ от ширины бруса, длина – $4/5$ от толщины бруса.

Для разработки схемы выбран второй тип деревянной шпалы с размерами $2750 \times 230 \times 160$ мм [10], соответственно размеры шипа будут составлять:

- для горизонтального расположения (см. рис. 3, а): широкая сторона – 138 мм, узкая – 92 мм, длина – 128 мм;

- для вертикального расположения (см. рис. 3, б): широкая сторона – 96 мм, узкая – 64 мм, длина – 184 мм.

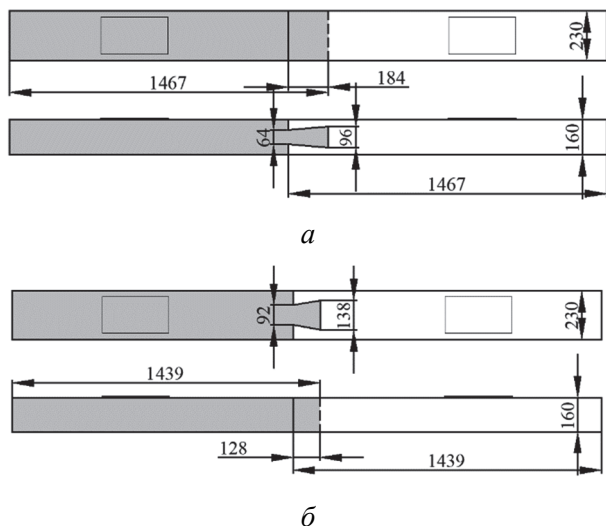


Рис. 3. Конструктивная схема составной шпалы с одним соединением «ласточкин хвост»: а – с горизонтальным расположением шипа; б – с вертикальным расположением шипа

Согласно схемам, в данных конструкциях возможно использовать остатки брусьев длиной 1,5 м и более. В соответствии с таблицей количество остатков длиной 1,5 м составляет 4,5 шт., а длиной 1,5 м и более – 43,25 шт., таким образом после изготовления комплекта переводных брусьев для одного стрелочного перевода возможно сделать соответственно 2 и порядка 20 составных шпал.

Минимальная эпюра шпал, установленная на железнодорожных путях, относится к прочим станционным путям и путям необщего пользования и составляет 1440 шт./км. С учетом объема изготавливаемых БШПЗ комплектов брусьев для стрелочных переводов (490 шт./год) количество составных шпал составит порядка $20 \cdot 490 = 9800$ шт., что покрывает потребность для 6,8 км.

С целью расширения возможности использования остатков брусьев длиной менее 1,50 м, а именно 1,25 и 1,0 м, объемы которых составляют соответственно 5 и 6,75 шт., разработаны еще две конструктивные схемы с двумя соединениями «ласточкин хвост». Ввиду работы при эксплуатации деревянной шпалы на изгиб восприятие ею нагрузки будет зависеть от направления расположения шипов: внутрь колеи (рис. 4) либо наружу (рис. 5).

Для разработки данных схем также выбрана деревянная шпала второго типа, поэтому размеры шипов соответствуют размерам шипов предыдущей схемы. Согласно схеме, приведенной на рис. 4, а, возможно использовать остатки брусьев длиной 1,25, 1,0 м и более. Согласно схеме 4, б, с учетом допуска на длину шпалы (2750 ± 5 мм) все три части

шпалы возможно изготовить из остатков длиной 1,0 м и более, причем остатки длиной 2,0 м и более рационально разделять на два бруса метровой длины.

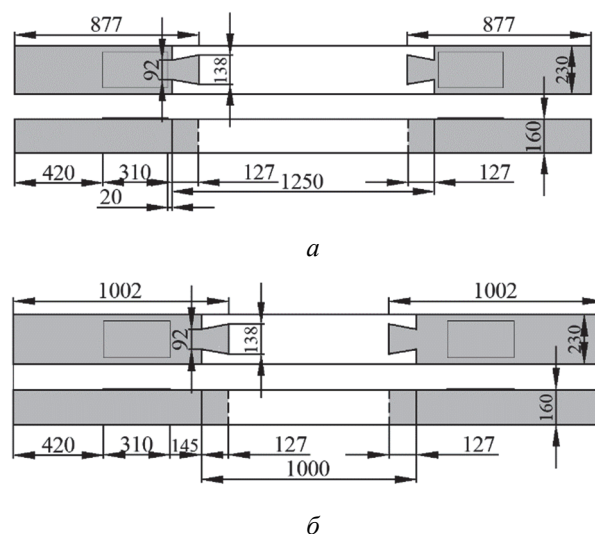


Рис. 4. Конструктивные схемы составной шпалы с двумя соединениями «ласточкин хвост», при расположении шипов внутрь колеи: а – с длиной среднего бруса 1,25 м; б – с длиной среднего бруса 1,0 м

Согласно таблице и количеству оставшихся брусьев расчетной длины, после изготовления комплекта переводных брусьев для одного стрелочного перевода возможно изготовить составные шпалы в следующем объеме:

1) 3 шпалы, если использовать для средней части остатки 1,25 м, для концевых – 1,0 м (всего остатков длиной 1,25 и 1,0 м соответственно 5 и 3,75 шт., таким образом $6,75 : 2 = 3,375 = 3$ шпалы);

– 10 шпал, если использовать для средней части остатки 1,25 и 2,50 м, а концевых – 1,0 и 2,0 м (всего остатков длиной 1,25, 2,50, 1,0 и 2,0 м соответственно 5, 16,5, 6,75 и 7,5 шт., следовательно, количество средних брусьев $5 + 16,5 = 21,5 = 21$ шт. и концевых $(6,75 + 7,5 \cdot 2) : 2 = 21,75 : 2 = 10,875 = 10$ шпал;

2) 2 шпалы, если использовать для средней и концевых частей остатки длиной 1,0 м (всего остатков длиной 1,0 м – 6,75 шт., таким образом $6,75 : 3 = 2,25 = 2$ шпалы);

– 7 шпал, если использовать для средней и концевых частей остатки длиной 1,0 и 2,0 м (всего остатков длиной 1,0 и 2,0 м соответственно 6,75 и 7,5 шт., таким образом $(6,75 + 7,5 \cdot 2) : 3 = 21,75 : 3 = 7,25 = 7$ шпал);

3) 29 шпал, если использовать все остатки длиной 1,0 м и более $((6,75 + 5 + 4,5 + 6 + 7,5 \cdot 2 + 8,75 \cdot 2 + 16,5 \cdot 2) : 3 = 87,75 : 3 = 29,25 = 29$ шпал).

Для учета варианта расположения шипов наружу колеи разработаны еще две схемы, представленные на рис. 5. Так как размеры составных частей таких шпал соответствуют варианту схемы с расположением шипов внутрь колеи, принцип применения брусьев и расчет количества составных шпал аналогичен предыдущему.

Для обоих вариантов ежегодно при использовании брусьев всех размеров длиной более 1,0 м с учетом среднего объема производства комплектов переводных брусьев, возможно изготовить до $29 \cdot 490 = 14\,210$ шт. Такое количество составных шпал покрывает потребность для 9,8 км железнодорожного пути прочих станционных путей и путей необщего пользования.

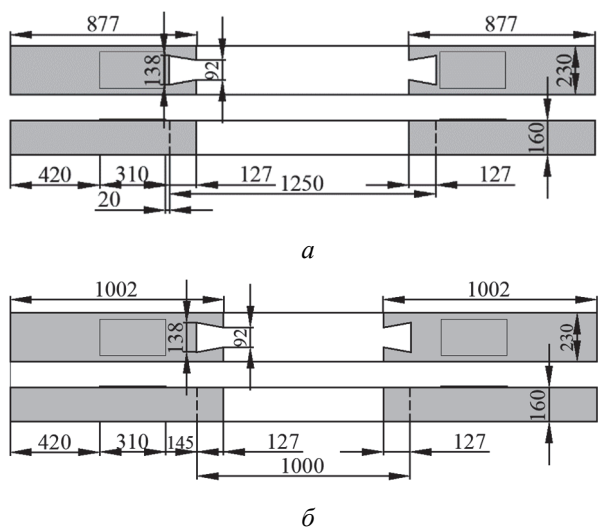


Рис. 5. Конструктивные схемы составной шпалы с двумя соединениями «ласточкин хвост» при расположении шипов наружу колеи:
а – с длиной среднего бруса 1,25 м;
б – с длиной среднего бруса 1,0 м

В качестве альтернативного варианта сращивания рассматривается соединение «прируб впритык в полдерева» (рис. 6). В подобных видах сращивания брусья стыкуются торцами, отрезанными под прямым углом, при этом концы брусьев накладываются друг на друга и скрепляются нагелями, металлическими накладками с болтами или скобами.

Для подобных схем составные части шпалы возможно изготавливать одинаковой длины (рис. 6, а), при этом длина участка перекрытия должна составлять не менее двух размеров толщины бруса. Для деревянных шпал второго типа минимальный размер перекрытия составит $160 \cdot 2 = 320$ мм.

В качестве нагелей возможно применение деревянных вкладышей либо металлических скоб, которые соединяют составные части в зоне перекрытия.

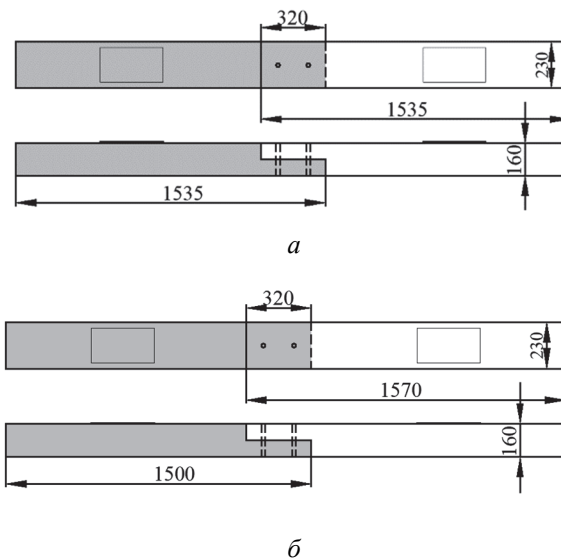


Рис. 6. Конструктивные схемы составной шпалы с соединением «прируб впритык в полдерева»:
а – при одинаковой длине составных частей;
б – при различной длине составных частей

При длине перекрытия 320 мм длина каждой из частей составит 1535 мм, что обеспечит применение остатков брусьев длиной 1,75 м и более.

С учетом того, что ни один из оставшихся брусьев невозможно разделить на две необходимые части, согласно разработанной конструктивной схеме можно изготовить порядка 19 составных шпал $((6 + 7,5 + 8,75 + 16,5) : 2 = 38,75 : 2 = 19,375$ шт.).

Для расширения полигона применения оставшихся брусьев, а именно брусьев длиной 1,50 м, и увеличения объема составных шпал разработана схема с различной длиной частей (рис. 6, б), одна из которых составляет 1500 мм.

При использовании всех брусьев длиной 1,50 м и более возможно изготовить порядка 21 составной шпалы $((4,5 + 6 + 7,5 + 8,75 + 16,5) : 2 = 43,25 : 2 = 21,625$ шт.).

С учетом среднегодовых объемов производства комплектов переводных брусьев в первом случае возможно изготовить $19 \cdot 490 = 9310$ шт. либо $21 \cdot 490 = 10\,290$ шт., что покрывает потребность соответственно для 6,5 либо 7,1 км прочих станционных путей и путей необщего пользования.

Для дополнительного предотвращения разъезжания составных частей в рассматриваемом типе соединения возможно устроить зацепление, называемое врубкой прямым зубом. Каждый прямой зуб заходит в паз второго блока (рис. 7).

Длина участка перекрытия должна составлять не менее 2,5 размеров толщины бруса, для шпал второго типа минимальный размер перекрытия составит $160 \cdot 2,5 = 400$ мм.

Разработанные конструктивные схемы предусматривают применение частей как одинаковой (рис. 6, а), так и различной (рис. 6, б) длины. Исходя из рассчитанных длин составных частей можно сделать вывод о возможности применения оставшихся брусьев аналогично предыдущему варианту.

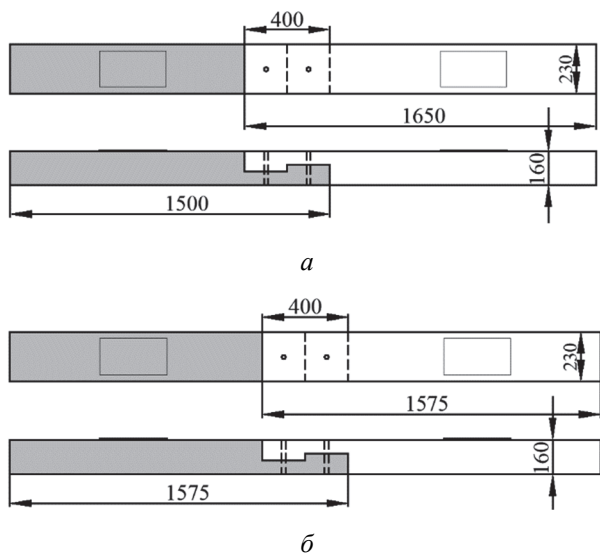


Рис. 7. Конструктивные схемы составной шпалы с соединением «прируб впритык в полдерева» с врубкой прямым зубом:
а – при одинаковой длине составных частей;
б – при различной длине составных частей

Все рассмотренные соединения в полдерева предполагается усилить двумя скобами, применяемыми для сохранения торцов шпал от растрескивания и располагаемыми по длине бруса на расстоянии друг от друга, обеспечивающем предохранение дерева от раскалывания.

Заключение. Проведена оценка перспективности применения деревянных брусьев различной длины, оставшихся после выпиливания переводных брусьев. Разработанные технологические схемы и конструкции составных шпал позволяют наиболее рационально реализовать остатки деревянных брусьев после выпиливания комплекта переводных брусьев для стрелочного перевода. Наиболее технологичными в изготовлении, предусматривающими наибольшую возможность использования остатков брусьев и эффективными в дальнейшей эксплуатационной работе определены следующие виды сращивания элементов составных шпал:

№ 1 – с одним соединением «ласточкин хвост» с горизонтальным расположением шипа;

№ 2 – с одним соединением «ласточкин хвост» с вертикальным расположением шипа;

№ 3 – с двумя соединениями «ласточкин хвост» при расположении шипов внутрь колеи с длиной среднего бруса 1,0 м;

№ 4 – с двумя соединениями «ласточкин хвост» при расположении шипов наружу колеи с длиной среднего бруса 1,0 м;

№ 5 – с соединением «прируб впритык в полдерева» при различной длине составных частей;

№ 6 – с соединением «прируб впритык в полдерева» с врубкой прямым зубом при различной длине составных частей.

Каждое сращивание характеризуется типом и месторасположением соединения, а также их количеством, при этом два последних предусматривают применение крепежных элементов.

Установлено, что для каждой из конструкций определены количества составных шпал, которые возможно изготовить, исходя из среднего количества брусьев расчетной длины и марки стрелочных переводов, применяемых на БЖД.

Исходя из расчетов количества составных шпал можно сделать вывод о том, что снижение материалоемкости и энергоемкости продукции идет за счет использования остатков брусьев по схемам с двумя соединениями «ласточкин хвост» при расположении шипов как наружу, так и внутрь колеи с длиной среднего бруса 1,0 м.

Изготовленные по разработанным технологическим схемам составные шпалы предполагается использовать на прочих станционных путях и путях необщего пользования, например для разрядки «кустов» шпал (три и более расположенных подряд негодных шпал), одиночной замены шпал, устройства комбинированной рельсошпальной решетки – две подряд цельнобрусковые шпалы, третья составная и т. п.

Реализация отходов брусьев позволит не только снизить непроизводительные расходы БШПЗ, но и снизить расход значимых сырьевых продуктов – древесины. С учетом среднего объема изготавливаемых стрелочных переводов составными шпалами возможно заменить цельнобрусковые шпалы с эapurой 1440 шт./км на участке протяженностью более 9 км в год. Для изготовления деревянных шпал на 1 км железнодорожного пути требуется практически 2 га 80-летних сосен, таким образом ежегодно можно будет сохранить до 18 га леса.

Список литературы

1. Положение о системе ведения путевого хозяйства Белорусской железной дороги: СТП БЧ 56.388-2022. Минск: Белорусская железная дорога, 2022. 30 с.
2. Особенности измерения и содержания рельсовой колеи на железобетонных шпалах / В. И. Матвеев [и др.] // Вестн. Днепропетров. нац. ун-та железнодорож. транспорта. Наука и

прогресс транспорта. 2007. № 17. С. 100–106. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-izmereniya-i-soderzhaniya-relsovoy-kolei-na-zhelezobetonnyh-shpalah> (дата обращения: 24.02.2021).

3. Невзорова А. Б., Романенко В. В. О целесообразности и перспективах применения деревянных шпал в криволинейных участках пути // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (246). С. 242–249.

4. Божелко И. К., Леонович И. К. Определение долговечности защитных средств для древесины, эксплуатируемой в тяжелых условиях // Труды БГТУ. 2011. № 2: Лесная и деревообработ. пром-сть. С. 200–203. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-dolgovechnosti-zaschitnyh-sredstv-dlya-drevesiny-ekspluatiruemoy-v-tyazhelyh-usloviyah> (дата обращения: 26.02.2021).

5. Анализ технологий шпалопропиточного производства ОАО «Борисовский шпалопропиточный завод» / В. П. Новик [и др.] // Вестник БелГУТ: наука и транспорт. 2021. № 1 (42). С. 65–67.

6. Мониторинг шпалопропиточного производства на Белорусской железной дороге / П. В. Ковтун [и др.] // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 24–25 ноября 2021 г., Гомель, 2021. С. 280–282.

7. Божелко И. К., Наумчик Т. А., Бабич Д. П. Исследование физико-механических свойств комбинированных шпал // Технология и техника лесной промышленности: тез. докл. 81-й науч.-практ. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 1–12 февр. 2017 г. Минск, 2017. С. 76.

8. Мазаник Н. В., Божелко И. К. Эксплуатационные характеристики клеев для составных деревянных конструкций // Труды БГТУ. 2016. № 2: Лесная и деревообработ. пром-сть. С. 136–139.

9. Итоги работы путевого хозяйства в 2021 году и задачи на 2022 год: отчет гос. объединения «Белорусская железная дорога». Минск: Белорус. ж. д., 2022. 16 с.

10. Текущее содержание железнодорожного пути. Технические требования и организация работ: СТП 09150.56.010-2005. Минск: Белорус. ж. д., 2005. 284 с.

11. Божелко И. К. Физико-механические свойства комбинированных деревянных шпал // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2018. № 1. С. 211–217.

12. Составная шпала: пат. RU 2256020 / Л. А. Занегин. Оpubл. 10.07.2005.

13. Составная композиционная шпала для железных дорог: пат. RU 2536569 / В. Я. Бершадский. Оpubл. 27.12.2014.

14. Составная шпала: пат. RU 2099460 / В. В. Шаповалов. Оpubл. 20.12.1997.

15. Шпала: пат. RU 214411 / Ж. Г. Дамбаев, П. К. Хардаев, В. Д. Балхеева, И. Ж. Дамбаева. Оpubл. 26.10.2022.

16. Миронов В. Г. Деревянные конструкции в вопросах и ответах. Расчет элементов цельного, составного и клееного сечений. Н. Новгород: Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т, ЭБС АСВ, 2017. 96 с.

17. Ашпиз Е. С. Подход к расчету показателей надежности элементов пути // Мир транспорта. 2011. № 5. С. 33–41.

18. Миронов В. Г. Курс конструкций из дерева и пластмасс в рисунках с комментариями / В. Г. Миронов. Н. Новгород: Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т, ЭБС АСВ, 2017. 146 с.

References

1. STP BCH 56.388-2022. Regulations on the track management system of the Belarusian Railway. Minsk, Belarusian Railway Publ., 2022. 30 p. (In Russian).

2. Matvetsov V. I., Kovtun P. V., Kebikov A. A., Krupoderov V. P., Miroshnikov N. Ye. Features of measurement and maintenance of rail track on reinforced concrete sleepers. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsionalnogo universiteta zhelezнодорожного транспорта. Nauka i progress transporta* [Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport. Science and Progress of Transport], 2007, no. 17, pp. 100–106. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-izmereniya-i-soderzhaniya-relsovoy-kolei-na-zhelezobetonnyh-shpalah> (accessed 24.02.2021) (In Russian).

3. Neuzorova A. B., Romanenko V. V. On the expediency and prospects of using wooden sleepers in curved sections of the track. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2021, no. 2 (246), pp. 242–249 (In Russian).

4. Bozhelko I. K., Leonovich O. K. Determination of durability of protective means for wood operated in severe conditions. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2011, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 200–203. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-dolgovechnosti-zaschitnyh-sredstv-dlya-drevesiny-ekspluatiruemoy-v-tyazhelyh-usloviyah> (In Russian).

5. Novik V. P., Sushchenok A. A., Tsarikov V. A., Kovtun P. V., Osipova O. V. Analysis of sleeper impregnation production technologies at OJSC “Borisov sleeper impregnation plant”. *Vestnik BelGUT: nauka i transport* [Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport], 2021, no. 1 (42), pp. 65–67 (In Russian).
6. Kovtun P. V., Osipova O. V., Sushchenok A. A., Dershan V. A. Monitoring of sleeper impregnation production on the Belarusian Railway. *Problemy bezopasnosti na transporte: materialy XI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems of transport safety: materials of the XI International scientific and practical conference]. Gomel, 2021, pp. 280–282 (In Russian).
7. Bozhelko I. K., Naumchik T. A., Babich D. P. Investigation of physical and mechanical properties of combined sleepers. *Tehnologiya i tehnika lesnoy promyshlennosti: tsesy dokladov 81-y nauchno-prakticheskoy konferentsii professorsko-prepodavatelskogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Technology and equipment of the forest industry: abstracts of the 81st scientific and practical conference of the teaching staff, researchers and postgraduates (with international participation)]. Minsk, 2017, p. 76 (In Russian).
8. Mazanik N. V., Bozhelko I. K. Performance characteristics of adhesives for composite timber structures. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 136–139 (In Russian).
9. *Itogi raboty putevogo khozyaystva v 2021 godu i zadachi na 2022 god: Otchet gosudarstvennogo ob'yedineniya “Belorusskaya zheleznaya doroga”* [Results of the work of the track economy in 2021 and tasks for 2022: report the State Association “Belarusian Railway”]. Minsk, Belarusian Railway Publ., 2022. 16 p. (In Russian).
10. STP 09150.56.010-2005. The current content of the railway track. Technical requirements and organization of work. Minsk, Belarusian Railway Publ., 2006. 284 p. (In Russian).
11. Bozhelko I. K. Physical and mechanical properties of combined wooden sleepers. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2018, no. 1, pp. 211–217 (In Russian).
12. Zanegin L. A. Composite sleeper. Patent RU 2256020, 2005 (In Russian).
13. Bershatsky V. Ya. Composite sleeper for railways. Patent RU 2536569, 2014 (In Russian).
14. Shapovalov V. V. Composite sleeper. Patent RU 2099460, 1997 (In Russian).
15. Dambaev Zh. G., Hardaev P. K., Balheeva V. D., Dambaeva I. Zh. Sleeper. Patent RU 214411, 2022 (In Russian).
16. Mironov V. G. *Derevyannyye konstruksii v voprosakh i otvetakh. Raschet elementov tsel'nogo, sostavnogo i kleyenogo secheniy* [Wooden structures in questions and answers. Calculation of elements of solid, composite and glued sections]. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, EBS ASV, 2017. 96 p. (In Russian).
17. Ashpiz E. S. An approach to the calculation of reliability indicators of path elements. *Mir transporta* [The World of Transport], 2011, no. 5, pp. 33–41 (In Russian).
18. Mironov V. G. *Kurs konstruksiy iz dereva i plastmass v risunkakh s kommentariyami* [Course of structures made of wood and plastics in drawings with comments]. Nizhny Novgorod. Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, EBS ASV, 2018. 146 p. (In Russian).

Информация об авторах

Романенко Виктория Владимировна – старший преподаватель кафедры «Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных объектов». Белорусский государственный университет транспорта (246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34, Республика Беларусь). E-mail: vromanenkko@mail.ru

Невзорова Алла Брониславовна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Нефтегазоразработка и гидропневмоавтоматика». Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого (246746, г. Гомель, пр. Октября, 48, Республика Беларусь). E-mail: anevzorova@gstu.by

Information about the authors

Romanenko Viktoriya Vladimirovna – Senior Lecturer, the Department of Design, Construction and Operation of Transport Facilities. Belarusian State University of Transport (34, Kirova str., 246653, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: vromanenkko@mail.ru

Neuzorava Alla Bronislavovna – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Oil and Gas Development and Hydropneumatics. Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Oktyabrya Ave., 246746, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: anevzorova@gstu.by

Поступила 25.02.2023

УДК 674.81.038.3:684.4.04

Л. В. Игнатович, Е. А. Лосик

Белорусский государственный технологический университет

**КОНСТРУКТИВНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
ДРЕВЕСНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ШПОНА
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТОЛЯРНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ
И КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕБЕЛИ (ОБЗОР)**

Актуальными задачами современной деревообрабатывающей промышленности являются: диверсификация производства древесных композиционных материалов на основе шпона; расширение разнообразия мебельных и столярно-строительных изделий, способных конкурировать на мировом рынке; оснащение предприятий современным оборудованием, позволяющим оперативно менять ассортимент изделий; расширение применения инновационных технологий и экологически чистых материалов.

В статье рассмотрен вопрос эффективного использования древесины мягколиственных пород для производства древесных композиционных материалов на основе шпона.

Анализ научной и технической литературы показал, что в настоящее время в деревообрабатывающей промышленности наблюдается увеличение объемов производства древесных композиционных материалов, столярно-строительных и мебельных изделий на их основе.

В данной статье выполнена оценка эффективности применения на деревообрабатывающих предприятиях Республики Беларусь композиционных материалов из шпона мягколиственных пород древесины, как альтернативного материала массивной древесине твердолиственных пород. Отмечены тенденции увеличения объемов производства шпона и композиционных материалов на его основе; зафиксировано увеличение производства конструктивных элементов мебели и столярно-строительных изделий; выполнено сравнение применяемых материалов.

Проведенный анализ научно-технической литературы позволил предложить ряд рекомендаций по следующим направлениям: 1) совершенствование выпускаемых столярно-строительных изделий и конструктивных элементов мебели на основе экологически чистых материалов; 2) снижение доли использования твердолиственных пород древесины.

Ключевые слова: композиционные материалы, столярно-строительные изделия, конструктивные элементы мебели, фанера, шпон.

Для цитирования: Игнатович Л. В., Лосик Е. А. Конструктивные и технологические особенности древесных композиционных материалов из шпона при производстве столярно-строительных изделий и конструктивных элементов мебели (обзор) // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 152–165. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-18.

L. V. Ignatovich, E. A. Losik

Belarusian State Technological University

**STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL FEATURES OF WOOD COMPOSITE
MATERIALS FROM VENEER IN THE PRODUCTION OF JOINERY
AND CONSTRUCTION PRODUCTS AND STRUCTURAL FURNITURE
ELEMENTS (REVIEW)**

The urgent tasks of the modern woodworking industry are: diversification of the production of wood composite materials based on veneer; expansion of the variety of furniture and joinery products that can compete on the world market; equipping enterprises with modern equipment that allows them to quickly change the range of products; expansion of the use of innovative technologies and environmentally friendly materials.

The article considers the issue of effective use of softwood wood for the production of wood composite materials based on veneer.

The analysis of scientific and technical literature has shown that currently in the woodworking industry there is an increase in the production of wood composite materials, joinery and metal products based on them.

This article evaluates the effectiveness of the use of composite materials from softwood veneer at woodworking enterprises of the Republic of Belarus as an alternative material to solid wood of hardwood species. Trends in the increase in the production of veneer and composite materials based on it have

been noted; an increase in the production of structural elements of furniture and joinery products was recorded; the materials used were compared.

The analysis of scientific and technical literature allowed us to offer a number of recommendations in the following areas: 1) improvement of manufactured joinery and construction products and structural elements of furniture based on environmentally friendly materials; 2) reduction of the share of the use of hardwoods.

Keywords: composite materials, joinery and construction products, structural elements of furniture, plywood, veneer.

For citation: Ignatovich L. V., Losik E. A. Structural and technological features of wood composite materials from veneer in the production of joinery and construction products and structural furniture elements (review). *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 152–165. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-18 (In Russian).

Введение. В настоящее время основной задачей лесной и деревоперерабатывающей промышленности является рациональное использование лесосырьевых ресурсов и производство экологически безопасной и конкурентоспособной продукции.

В Республике Беларусь ценные твердолиственные породы составляют около 4% от основных лесообразующих пород, хвойные – 58,5%, в то же время доля малоценных пород составляет примерно 37%, в том числе: березы – 23,3%, ольхи – 10,8%, осины – 2,6% (статистические данные Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь по состоянию на 1 января 2022 г). Анализ статистических данных позволил заключить, что при общей заготовке древесины примерно 21,9 млн. м³ в год для производства древесных композиционных материалов из шпона, изделий мебели и столярно-строительных изделий ее не хватает, особенно ценных твердолиственных пород [1].

В табл. 1 представлена динамика производства шпона и древесных композиционных материалов на его основе за 2017–2021 годы [2].

Анализ данных таблицы позволяет сделать вывод, что за период с 2017 по 2021 г. производство шпона лущеного и древесных композиционных материалов на его основе (фанера, многослойные панели или плиты паркетные собранные) в целом имеет положительную динамику.

Динамика производства и потребления продукции из шпона имеет обратную зависимость

с количеством запасаемой древесины и материальным состоянием населения. Сокращению производства строганого шпона способствуют небольшие запасы древесины твердолиственных пород и его высокая стоимость.

В табл. 2 представлен баланс товарных ресурсов композиционных материалов (фанеры) Республики Беларусь в натуральном выражении, которые отражают движение товара (фанерной продукции) от момента производства до момента конечного его использования [3].

Товарный баланс фанерной продукции составляется для анализа объемов поступившей продукции на склад предприятия, объемов ее реализации и наличия остатков на начало и конец периода, а также выявления потерь и излишков продукции. На основании приведенных данных баланса товарных ресурсов можно определить скорость товарооборота фанеры за прошлый и отчетный годы, отклонения и темпы роста, эффективность использования имеющегося баланса товарных ресурсов композиционных материалов (фанеры) с целью разработки инновационных технологий их производства.

Анализируя показатели баланса товарных ресурсов фанеры (табл. 2), можно сделать заключение, что рынок фанерной продукции характеризуется постоянным ростом объемов производств. Тем не менее, в 2021 г. наблюдалось снижение импорта фанеры и рост экспорта [4–6].

На рис. 1 показана диаграмма объема производства мебели в 2017–2021 гг. (в млрд BYN).

Таблица 1

Динамика производства шпона и древесных композиционных материалов на его основе за 2017–2021 гг.

Изделия (материал)	Единицы измерения	Динамика производства материалов				
		2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
Фанера	тыс. м ³	258,2	296,8	299,9	343,2	385,0
Шпон лущеный	м ³	5743	8026	6953	5944	11 215
Шпон строганый	тыс. м ²	2373	2277	1781	1519	1390
Многослойные панели и плиты паркетные собранные	тыс. м ²	606,4	700,9	848,0	916,8	1088,4

Таблица 2

Баланс товарных ресурсов композиционных материалов – фанеры

Баланс товарных ресурсов	Единицы измерения	Объемы реализации и наличие остатков				
		2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
Ресурсы материалов						
Запасы на начало года	м ³	24 649	28 877	47 960	59 212	49 080
Производство		158 155	296 764	299 898	343 240	385 010
Импорт		22 847	35 473	44 019	50 395	46 983
Страны СНГ		20 515	34 151	40 791	49 024	45 225
Страны вне СНГ		2332	1322	3228	1371	1758
Итого ресурсов		305 651	361 114	391 877	452 847	481 073
Использование						
Потреблено в республике	м ³	56 910	70 810	79 195	72 075	49 718
Экспорт		219 864	242 344	253 470	331 692	377 520
Страны СНГ		40 440	38 461	57 545	81 241	76 285
Страны вне СНГ		179 424	203 883	195 925	250 451	301 235
Запасы на конец года		28 877	47 960	59 212	49 080	53 835

Как показано на диаграмме, объем производства мебельной продукции в 2021 г. зафиксирован на уровне 2,7 млрд руб., что составляет 1,4% ВВП страны. В среднем за 2017–2021 гг. объем производства мебели в Беларуси увеличился на 26,5% ежегодно [7, 8].

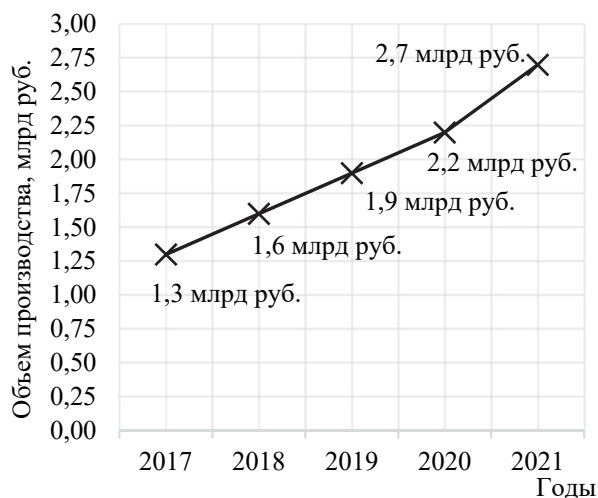


Рис. 1. Диаграмма объема производства мебели в 2017–2021 гг.

Вышесказанное предопределяет, что основной задачей деревообрабатывающей промышленности по производству древесных композиционных материалов из шпона и изделий из них является диверсификация производства – расширение ассортимента конкурентоспособных изделий, которые могли бы конкурировать на мировом рынке, внедрение инновационных технологий, оснащение предприятий новым специализированным оборудованием, позволяющим оперативно менять ассортимент изделий с использованием современных экологически чистых материалов. Именно от степени инновационности,

т. е. способности использовать те или иные технические новинки и новые методы производства изделий из древесины, зависит экономическая эффективность и конкурентоспособность предприятий и отраслей экономики в целом [9].

Целью данного обзорно-аналитического исследования являлась необходимость всестороннего анализа наиболее важных перспективных направлений развития производства древесных композиционных материалов из шпона при производстве столярно-строительных изделий и конструктивных элементов мебели в Республике Беларусь. Для достижения цели исследования была поставлена следующая задача: обосновать необходимость совершенствования производственной деятельности предприятий деревообрабатывающей промышленности по производству древесных композиционных материалов из шпона с целью расширения ассортимента конкурентоспособных изделий.

Основная часть. Древесные композиционные материалы занимают существенное место в общей структуре лесопромышленного комплекса, обеспечивая потребности мебельного и столярно-строительного производств. По масштабам производства и применения на одном из первых мест среди других древесных композиционных материалов находятся фанера и фанерные плиты. Производство фанеры является рентабельным и быстро окупаемым. Современные технологии позволяют производить данный вид продукции и изделия из нее высокого качества из доступного сырья (мягколиственных и хвойных пород древесины) [10, 11].

Фанера представляет собой материал из нескольких слоев шпона (три и более), склеенных между собой. Чаще всего для производства фанеры используется древесина березы, которая обладает равномерной плотностью и высокой

прочностью, что способствует получению качественного шпона. Предел прочности шпона при растяжении вдоль волокон, например из древесины березы – 153 МПа, ольхи – 93,2 МПа, сосны – 70,6 МПа, лиственницы – 69,9 МПа [12–16].

Как видим, наиболее высокий предел прочности шпона при растяжении вдоль волокон имеет шпон из древесины березы, чем и объясняются лучшие механические свойства клееной фанеры из березового шпона. Прочность шпона из древесины ольхи в 1,5 раза, а шпона из хвойных пород в 2,0 раза меньше, чем березового. Древесина хвойных пород используется реже, так как содержащаяся в ней смола затрудняет получение качественного шпона. На рис. 2 показаны образцы фанеры разной слоистости, т. е. состоящей из разного количества листов березового шпона.



Рис. 2. Образцы фанеры разной слоистости из березового шпона

Фанера сочетает в себе высокую прочность, стойкость к деформации и растрескиванию вдоль волокон. Размеры фанерного листа варьируют, что способствует подбору оптимального варианта и минимизации отходов материала при использовании. Однако этот материал имеет сравнительно низкую устойчивость к деструктивному воздействию влаги, а также ограниченность в теплообережении. Постоянный контакт фанеры с влагой может повлечь за собой потерю изначальной

формы (изменение геометрии и разбухание). Исследования показывают, что фанера, фанерные плиты имеют высокие физико-механические свойства. Например: прочность при изгибе составляет 25 МПа, прочность при растяжении вдоль волокон 30 МПа. В табл. 3 представлены основные физико-механические свойства фанеры [12–18].

Из фанеры изготавливают декоративные элементы мебели; задние стенки и полки шкафов и тумб; задние стенки, стенки боковин, выдвигаемые ящики и донья мягкой мебели; спинки кроватей; перегородки, стеновые панели; многослойные паркетные изделия; гнукотклеенные детали с внешними слоями из строганого шпона [19].

В последние годы отдается предпочтение многослойным паркетным изделиям и стеновым панелям из композиционных материалов на основе фанеры.

В качестве основного сырья для изготовления, например, паркетных изделий и стеновых панелей, как альтернатива классическим технологиям и конструкциям, предлагается использование лущеного шпона мягколиственных пород древесины, которые, как известно, не обладают высокими физико-механическими свойствами и красивой текстурой, но хорошо поддаются модификации, термомодификации (уплотнению) и окрашиванию [20, 21].

Технология изготовления многослойных паркетных изделий и стеновых панелей из шпона может быть следующей [22, 23]: раскрой лущеного шпона мягких лиственных пород (березы, осины, ольхи) на заготовки необходимого размера; сквозное окрашивание полученных листов лущеного шпона (если есть необходимость создавать цветовую гамму); подбор листов шпона в композицию; нанесение клевого водостойкого состава; набор листов шпона в пакеты и подпрессовка пакетов перед склеиванием; прессование (склеивание блока необходимой толщины) под высоким давлением в прессе; обработка (раскрой) на детали необходимого размера.

Таблица 3

Физико-механические свойства фанеры из шпона древесины березы

Наименование показателя	Толщина, мм	Марка	Значение физико-механических показателей
Влажность фанеры	3–30	ФСК, ФК	5–10%
Предел прочности при статическом изгибе вдоль волокон наружных слоев	7–30		Не менее 25 МПа
Предел прочности при растяжении вдоль волокон	3–6,5		Не менее 30 МПа
Твердость	9–30		20 МПа
Звукоизоляция	6,5–30		23 дБ
Биологическая стойкость, класс опасности	3–30		5 fDa, St

На рис. 3 показана схема изготовления клееных композиционных материалов и фрагмент клееного блока из шпона для паркетных изделий и стеновых панелей покрытия с лицевым слоем сложного рисунка.

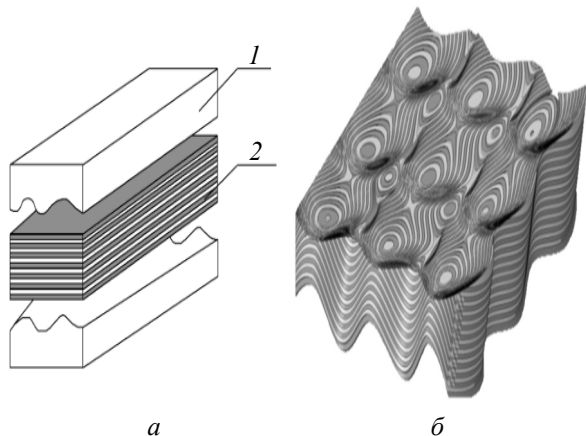


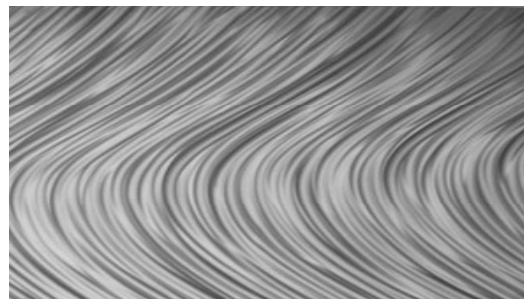
Рис. 3. Схема прессования блока шпона в шаблоне с волнистой поверхностью (а) и фрагмент клееного блока из шпона с лицевым слоем сложного рисунка (б): 1 – пресс-форма; 2 – клееный блок из шпона

Для получения клееного блока для данных изделий, лущеный шпон с нанесенным клеем помещают в специализированную оснастку – пресс-форму под высоким давлением. Шаблон для прессования может иметь в сечении (перпендикулярном направлению длины волокон древесины листов шпона) волнистую поверхность, благодаря чему заготовки приобретают волнистую форму вдоль волокон. Используя при прессовании блока шаблоны различной конструкции, можно получать клееный монолитный блок, в объемной структуре которого слои шпона изогнуты в соответствии с заданной формой. Толщина блока может быть равной толщине готового клееного композиционного материала. По сравнению с обычными изделиями на основе клееной фанеры данный материал обладает рядом неоспоримых преимуществ за счет уплотнения слоев шпона: высокой прочностью, влагостойкостью, твердостью, износостойкостью, позволяющих получать изделия, удовлетворяющие требованиям СТБ и имеющие возможностью использования не только в столярном производстве, но и в широком спектре общестроительных направлений [24].

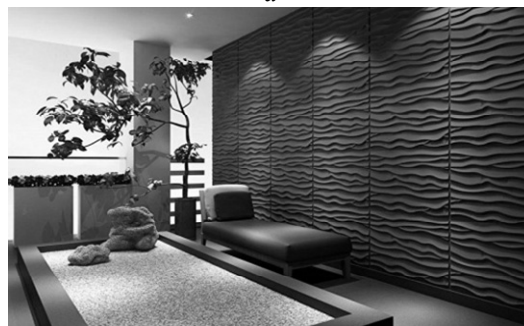
На рис. 4 показан фрагмент стеновых панелей (выполненных по вышеописанной технологии изготовления клееного блока из шпона) для внутренней отделки и интерьер жилого помещения с отделкой стен из данного материала.

Дизайнеры все чаще используют фанеру в качестве декоративного материала. Универсальность применения и декоративные свойства фа-

неры позволяют использовать ее в отделке помещений в виде стеновых панелей (рис. 4, б), перегородок и создании элементов декора, а натуральность и относительно невысокая цена способствуют популярности использования фанеры при создании экоинтерьеров.



а



б

Рис. 4. Фрагмент стеновых панелей из фанеры (клееного блока из шпона) для внутренней отделки (а) и интерьер жилого помещения (б)

Отдельную нишу применения древесных композиционных материалов из шпона в строительстве занимает ЛВЛ-брус (*LVL*). Аббревиатура ЛВЛ происходит от английского *Laminated Veneer Lumber* – пиломатериал из слоеного шпона [25].

Инновационная технология в области деревообрабатывающей промышленности в настоящее время позволяет получать конструкционные композиционные материалы, технические характеристики которых значительно превосходят параметры цельного (массив древесины) бруса, клееной древесины из пиломатериалов высокого класса. Новый конструкционный материал ЛВЛ-брус – это разновидность клееного композиционного материала, получаемого путем склеивания листов однонаправленного лущеного шпона хвойных пород толщиной порядка 3 мм. Волокна древесины шпона смежных слоев располагаются параллельно, что делает материал однородным, практически монолитным и придает ему более высокие эксплуатационные свойства даже по сравнению с клееным брусом из пиломатериалов. Прочность ЛВЛ-бруса в 1,5–3,0 раза выше, чем у традиционного строительного бруса [26, 27].

ЛВЛ-брус обладает исключительными по своим свойствам прочностными характеристиками: модуль упругости (жесткости) у ЛВЛ-бруса на 24%, а прочность при изгибе и на излом в 2 раза выше, чем у древесины хвойных пород (например, ели). Эти физико-механические показатели обеспечивают высокую несущую способность при меньших размерах в поперечном сечении, что в свою очередь существенно снижает общий объем необходимых пиломатериалов, повышает износостойкость и физико-механические показатели (по сопротивлению изгибу и растяжению вдоль волокон он почти в 2 раза превосходит массивный брус).

Благодаря своей слоистой структуре и технологии производства ЛВЛ-брус является полностью однородным с неизменными механическими характеристиками по всей длине и обладает постоянными физическими свойствами, способен сохранять точные линейные размеры, не зависящие от сезонных факторов. Уплотнение слоев шпона посредством прессования под высоким давлением также способствует улучшению физико-механических показателей и стабильности геометрических форм [26–29].

ЛВЛ-брус применяется для изготовления несущих балок для нижних, межэтажных и верхних перекрытий, в несущих и ненесущих конструкциях стен, в проемах, а также как опоры и ребра жесткости.

На рис. 5 показан фрагмент ЛВЛ-бруса и строительного портала из такого бруса (балки межэтажного перекрытия).

Существует 4 типа ЛВЛ-бруса: *Rs*, *R*, *X*, *I*. Типы *Rs* и *R* применяются преимущественно в несущих конструкциях; *X* в несущих и ограждающих конструкциях; *I* в ограждающих конструкциях, в том числе как заготовки для изготовления элементов межкомнатных дверных блоков и конструктивных элементов мебельных изделий. В табл. 4 приведены физико-механические показатели ЛВЛ-бруса различного назначения [30].

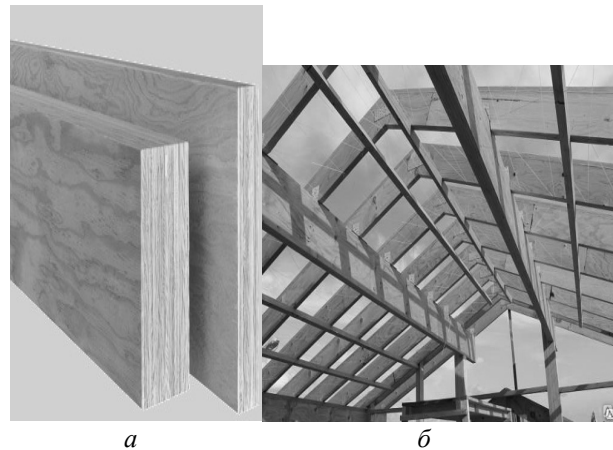


Рис. 5. Фрагмент ЛВЛ-бруса (а) и строительного портала из него (б)

Тем не менее, наряду с высокими положительными качествами, ЛВЛ-брус имеет и недостатки, например высокую стоимость (54 руб/м³ – ЛВЛ-брус; 30 руб/м³ – клееный брус), токсичность, связанную с наличием в технологическом составе легирующих добавок на основе формальдегида, который входит в состав клевого материала.

Еще одно из направлений широкого применения клееных композиционных материалов (строительной фанеры) – клефанерные деревянные конструкции двутаврового и коробчатого сечения: балочные, арочные, рамные, сетчатые и щитовые. Клефанерные изделия являются наиболее эффективным и перспективным видом ограждающих конструкций.

В данных конструкциях применяют водостойкую строительную фанеру с плотностью $\rho = 700\text{--}800 \text{ кг/м}^3$, склеенную с применением водостойких клеев, или бакелизованную совершенно водостойкую фанеру с объемным весом $\rho = 900\text{--}1150 \text{ кг/м}^3$, склеенную из слоев шпона, частично или полностью пропитанных клеями, например феноло-формальдегидными, под давлением в прессе $p = 30\text{--}35 \text{ кг/см}^2$ [31].

Таблица 4

Физико-механические показатели ЛВЛ-бруса для несущих, ограждающих конструкций, элементов дверных блоков и мебели

Физико-механические показатели	Расчетное сопротивление при разном направлении волокон	Типы ЛВЛ-бруса			
		<i>Rs</i>	<i>R</i>	<i>X</i>	<i>I</i>
Сопротивление сжатию	Вдоль волокон, МПа	25,7	23,6	19,8	22,1
	Поперек волокон (ребро), МПа	4,3	3,5	6,8	3,8
	Поперек волокон (пласть), МПа	1,9	1,7	1,9	1,7
Сопротивление растяжению	Вдоль волокон, МПа	26,9	22,5	17,5	16,9
	Поперек волокон, МПа	–	0,7	–	–
Сопротивление изгибу	Вдоль волокон (ребро), МПа	27,3	26,8	19,6	22,7
	Вдоль волокон (пласть), МПа	35,5	27,8	24,1	22,9
Сопротивление скалыванию	Вдоль волокон, МПа	–	2,6	2,6	–
	Поперек волокон, МПа	–	1,1	1,1	–

Предел прочности на срез поперек волокон наружного шпона для березовой водостойкой строительной фанеры равен 114,71 МПа, а на растяжение вдоль волокон – 62,8–73,6 МПа. Модуль упругости для строительной фанеры может колебаться в пределах от 80 000 до 120 000 кг/см² [32, 33].

По форме сечения клеефанерные изделия – балки могут быть коробчатыми, двутавровыми, двутаврово-коробчатыми (склеенными из двух или нескольких двутавров), треугольными, трапециевидными.

Наибольшее распространение в строительстве в качестве ограждающих конструкций из клееных древесных композиционных материалов получили коробчатые, двутавровые, двутаврово-коробчатые виды клеефанерных балок [34], изображенных на рис. 6.

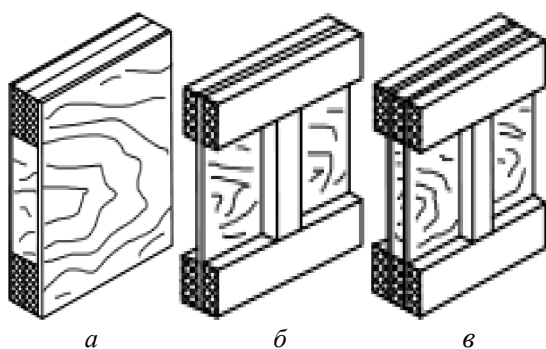


Рис. 6. Сечения клеефанерных балок:

а – коробчатое сечение; *б* – двутавровое сечение;
в – двутаврово-коробчатое сечение

Использование этих балок позволяет снизить массу деревянных конструкций. Традиционно клеефанерные балки состоят из дощатых поясов и фанерных стенок. При производстве клеефанерной балки с прямолинейной стенкой пояса балок могут выполняться из цельной или клееной древесины, а также из ЛВЛ-бруса. Стенки изготавливаются из фанеры или плитных материалов на основе древесины: ДВП (древесноволокнистые плиты), ОСП (ориентированно-стружечные плиты) и др. К достоинствам таких балок можно отнести малую массу, минимальный расход материала, высокую несущую способность, возможность поточного производства, легкость монтажа и транспортировки [35–38].

Также следует отметить, что в деревообрабатывающей отрасли наиболее интересный сегмент занимает мебельное производство, наибольшая добавленная стоимость которого иногда может в десятки раз превышать добавленную стоимость производства композиционных плитных материалов. Известно, что при производстве мебели максимально перерабатывается древес-

ное сырье, и поэтому готовая продукция имеет высокую добавленную стоимость [9].

Таким образом, основными задачами мебельного производства Республики Беларусь, являются снижение материалоемкости и импортоемкости изделий, повышение качества выпускаемой продукции, расширение ассортимента, изменение вида продукции, а также освоение продукции на основе новых экологических материалов.

Ассортиментная программа выпуска мебели предусматривает производство как простой мебели, так и высокохудожественных экономически эффективных конкурентоспособных изделий [9].

Одним из направлений диверсификации, т. е. расширения ассортимента конструктивных элементов мебели на основе освоения новых видов материалов, является применение древесных композиционных материалов из шпона.

Современный рынок мебели отличается большим разнообразием продукции, чему способствует широкий ассортимент материалов, и трудно сказать, какой материал будет популярен в будущем, очевидно лишь то, что мебель из экологически чистых материалов всегда будет в тренде, и одним из таких материалов являются древесные композиционные материалы из шпона, например фанера, гнutoкленные элементы мебельных изделий из шпона [39].

В современном направлении дизайнерских решений при разработке конструкций мебели и ее конструктивных элементов наметилась тенденция применения композиционных материалов – гнutoкленной фанеры. Наиболее широкое распространение она получила в производстве радиусных деталей фасадов корпусной, мягкой и детской мебели, криволинейных карнизов, предметов декора, при оформлении интерьера жилых и общественных помещений; в качестве малых архитектурных форм и т. п.

Гнutoкленные заготовки представляют собой слоистый материал из шпона, которому в процессе склеивания придается требуемую форму. Для повышения эстетических качеств изделий заготовки нередко облицовывают строганым шпоном древесины твердолиственных, ценных пород [40].

Благодаря эластичности, прочности и легкости в обработке этот материал (гнutoкленные заготовки) очень удобен для создания предметов мебели самых немыслимых и оригинальных форм. Достоинство его – отсутствие соединений в узлах, что повышает долговечность изделий в целом.

При конструировании гнutoкленных радиусных элементов мебели сложного дизайна необходимо знать, какую предельную кривизну можно

придавать отдельным слоям шпона, не вызывая разрушения или появления заметных трещин. Допустимые соотношения H/R (где H – толщина изгибаемой пластины, R – внутренний радиус) при гнутье в пресс-формах составляют не более: для березы – $1/60$; ели – $1/57$; бука – $1/46$; вяза – $1/31$.

Для изготовления гнutoкленных заготовок применяют лущеный шпон преимущественно из древесины березы, ольхи и других лиственных пород, реже – из древесины хвойных пород.

Толщина шпона зависит от сложности профиля, конструкции пакета, углов и радиусов изгиба и составляет $0,8-2,2$ мм. Своими специфическими свойствами гнutoкленная фанера обязана особому строению слоев, имеющих перекрестное или прямолинейное расположение волокон.

В табл. 5 приведены возможно минимальные радиусы кривизны гнutoкленных элементов из шпона при прессовании пакета в пресс-форме [41, 42].

На рис. 7 показан пресс для изготовления гнutoкленных изделий и схема гнутья слоев шпона (блока шпона толщиной $h = 16-18$ мм), радиусом 90° для изготовления гнutoкленных конструктивных элементов [43, 44].

Гнutoкленные заготовки изготавливают в прессах, оборудованных пресс-формами, состоящими из пуансона и матрицы. Промазанные клеем пакеты шпона определенной толщины помещаются в пресс-форму (рис. 7, б), закрепленную в станке (рис. 7, а). Затем в прессе заготовку изгибают на заданный контур, как правило, изгибают одновременно несколько заготовок (кратных по толщине).

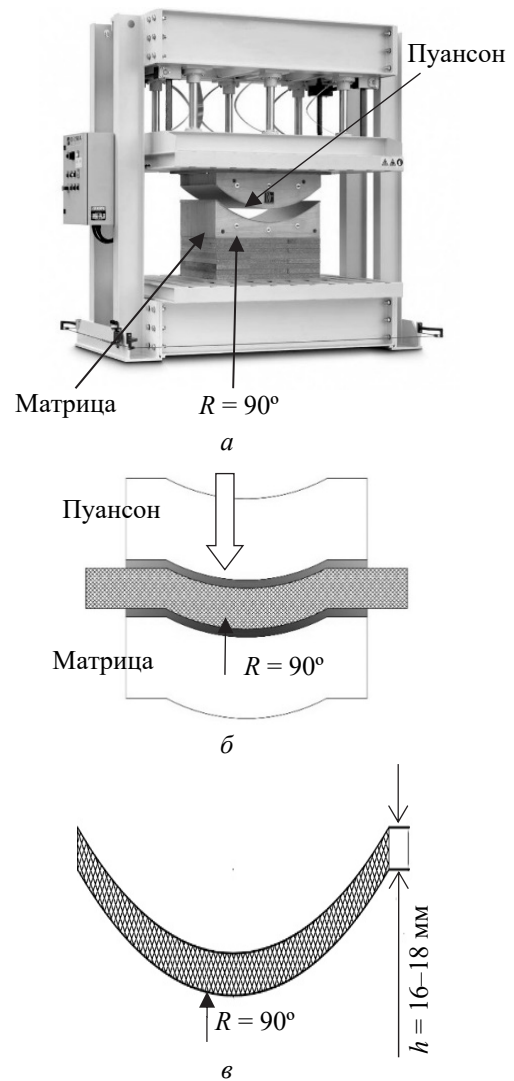


Рис. 7. Оборудование и схема гнутья: а – пресс; б – пресс-форма; в – схема прессования

Таблица 5

Радиусы изгиба пакетов шпона в пресс-форме

Толщина шпона, мм	Количество слоев шпона в пакетах	Толщина заготовки, мм	Угол изгиба пакета шпона, град, при допустимом минимальном радиусе изгиба, мм					
			60			90		
			Параллельное расположение волокон			Перекрестное расположение волокон		
0,8	5	4	14	12	7	6	15	8
	9	7	11	10	6	14	13	7
	13	10	10	8	5	11	10	6
1,15	5	6	35	27	14	34	33	16
	9	11	28	20	11	33	32	13
	13	16	20	19	6	27	26	6
1,5	5	7	37	36	29	37	37	33
	9	13	30	29	23	31	31	28
	13	19	23	22	16	25	24	20
2,2	5	11	40	40	30	–	42	41
	9	20	–	30	22	–	311	30
	13	29	–	20	13	–	20	19

При склеивании в прессе пакет деформируется и приобретает форму заготовки, которая закрепляется в результате отверждения клея и уменьшения влажности пакета. Согнутые заготовки поступают на сушку с целью стабилизации формы. После стабилизации отклонение размеров гнутых заготовок от первоначальных может составлять ± 3 мм. Далее заготовки обрабатывают [45, 46].

На рис. 8 представлены примеры гнутоклеевых изделий, имеющих оригинальное конструктивное решение сложных радиусных форм.

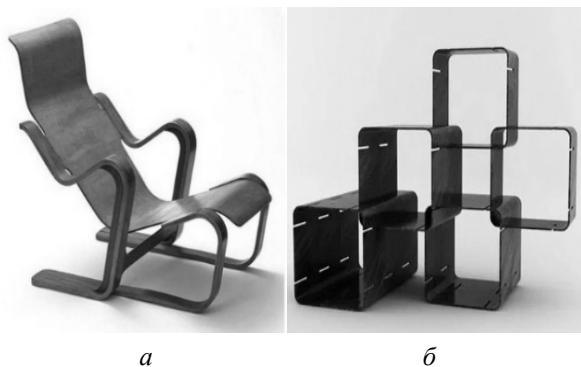


Рис. 8. Примеры гнутоклеевых изделий:
а – кресло; б – стеллаж

На рис. 8, а продемонстрировано кресло, имеющее цельное сиденье и спинку изготовленные из гнутоклеевой пятислойной фанеры. Каркасная конструкция состоит из двух вертикальных стоек из десяти слоев фанеры, поддерживающих руки, и горизонтальной стойки, укрепляющей ноги кресла [47].

На рис. 8, б изображена модульная кубическая система хранения, изготовленная из гнутоклеевой фанеры, легко собираемая и разбираемая благодаря прорезям и подходящая для создания книжных стеллажей, тумб под телевизор, перегородок и т. п. [48].

Вышесказанное позволяет сделать вывод, что производство гнутоклеевых заготовок и изделий мебели из древесных композиционных материалов на основе шпона – это практичное и экономически выгодное решение по сравнению с производством из натуральной древесины. Расход сухого шпона на 1 м^3 гнутоклеевых деталей из него составляет $1,9\text{--}3 \text{ м}^3$, а расход древесины на изготовление стolarных деталей сложного профиля достигает 5 м^3 . Однако трудозатраты на изготовление гнутоклеевых заготовок по сравнению с производством заготовок из древесины увеличиваются на 25–35%, но это компенсируется увеличением себестоимости продукции из композиционных материалов на 20–30% [49, 50].

Заключение. На основании выполненного обзорно-аналитического исследования:

- установлено, что в конструктивных и технологических особенностях стolarно-строительных изделий и элементов мебели наметилась тенденция к расширению применения клееных композиционных материалов на основе шпона хвойных и мягких лиственных пород древесины;

- определено, что наибольшие изменения в технологии производства древесных композиционных материалов из шпона произошли в процессе изготовления стolarно-строительных изделий;

- выявлено недостаточное использование хвойных и мягких лиственных пород древесины для изготовления стolarно-строительных изделий и конструктивных элементов мебели.

Таким образом, применение композиционных материалов при производстве конструктивных деталей мебели и стolarно-строительных изделий позволит снизить расход круглых лесоматериалов примерно в 1,5 раза и сократить трудозатраты не менее чем на 20%.

Список литературы

1. Породный состав лесов // М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь. URL: <https://www.mlh.by/our-main-activities/forestry/forests/> (дата обращения 15.02.2023).
2. Промышленность Республики Беларусь // Национальный статистический комитет Респ. Беларусь. URL: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/b96/pj4tqx1ai2cs190nqwjp9xjp3acglx4j.pdf> (дата обращения: 15.02.2023).
3. Балансы товарных ресурсов Республики Беларусь // Национальный статистический комитет Респ. Беларусь. URL: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/1c2/60efc3xfmbeokk3cvb9nnw19wn3nqzsz.pdf> (дата обращения: 15.02.2023).
4. Тулейко В. В., Игнатович Л. В. Особенности внешнеэкономической деятельности деревообрабатывающей промышленности Республики Беларусь // Технология и техника лесной промышленности: тез. докл. 85-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 3 февр. 2021 г. Минск, 2021. С. 133–134.
5. Анализ возможности применения в производстве изделий из древесины энергосберегающих и экологически безопасных технологий / А. С. Чуйков [и др.] // Технология и техника лесной промышленности: тез. докл. 86-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 8 февр. 2022 г. Минск, 2022. С. 189–192.

6. Технология виртуальной и дополненной реальности для пространственного представления и обеспечения конкурентоспособности продукции деревообрабатывающих предприятий / А. С. Чуйков [и др.] // Строительство: технологии и оборудование: Ярмарка инновационных разработок. Минск, 18 марта 2021 г. Минск, 2021. С. 12–13.
7. Обзор рынка офисной мебели Республики Беларусь // Мебелинк. URL: <https://bikratings.by/wp-content/uploads/2022/02/obzor-rynka-ofisnoj-mebeli.pdf> (дата обращения: 15.02.2023).
8. Объем производства мебели // Thinktanks. URL: <https://thinktanks.by/publication/2022/02/23/emkost-belorusskogo-rynka-ofisnoy-mebeli-budet-rasti.html> (дата обращения: 15.02.2023).
9. Программа развития деревообрабатывающего и мебельного производства концерна «Беллесбумпром» на период до 2025 года / Белорус. производ.-торговый концерн лесной, деревообраб. и целлюлоз.-бумаж. пром-сти. Минск, 2020. 70 с.
10. Батаев А. А., Батаев В. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение. М.: Логос, 2006. 398 с.
11. Худяков В. А. Современные композиционные строительные материалы. Ростов-н/Д: Феникс, 2007. 220 с.
12. Шпон лущеный. Технические требования: ГОСТ 99–2016. М.: Стандартиформ, 2018. 12 с.
13. Фанера общего назначения с наружными слоями из шпона лиственных пород. Технические условия: ГОСТ 3916.1–2018. М.: Стандартиформ, 2019. 25 с.
14. Фанера общего назначения с наружными слоями из шпона хвойных пород. Технические условия: ГОСТ 3916.2–2018. М.: Стандартиформ, 2019. 28 с.
15. Шпон лущеный. Методы испытаний: ГОСТ 20800–75. М.: Стандартиформ, 1976. 7 с.
16. Древесина слоистая клееная. Методы определения предела прочности и модуля упругости при растяжении: ГОСТ 9622–2016. М.: Стандартиформ, 2018. 10 с.
17. Игнатович Л. В., Скроцкий А. И. Повышение экологических характеристик древесных композиционных материалов путем совершенствования рецептуры клеевой композиции // Технология и техника лесной промышленности: тез. докл. 83-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 1–14 февр. 2019 г. Минск, 2019. С. 78–79.
18. Барташевич А. А., Игнатович Л. В., Коробко Е. В. Конструктивные особенности столярно-строительных изделий на основе фанеры повышенной водостойкости // Технология и техника лесной промышленности: тез. докл. 82-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 1–14 февр. 2018 г. Минск, 2019. С. 44.
19. Игнатович Л. В., Шетько С. В., Скроцкий А. И. Комплексное и рациональное использование шпона в производстве столярно-строительных изделий // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2018. № 1. С. 54–58.
20. Игнатович Л. В., Шетько С. В. Технология производства мебели и столярно-строительных изделий. М.: ИНФРА-М, 2022. 242 с. DOI: 10.12737/1030852.
21. Технология изделий из древесины / А. А. Барташевич [и др.]. М.: ИНФРА-М, 2020. 437 с.
22. Барташевич А. А., Игнатович Л. В. Материалы деревообрабатывающих производств. М.: ИНФРА-М, 2020. 307 с.
23. Игнатович Л. В. Изготовление многослойных паркетных досок с лицевым слоем из уплотненного шпона // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды X Международного евразийского симпозиума, Екатеринбург, 22–25 сент. 2015 г. Екатеринбург, 2015. С. 41–46.
24. Игнатович Л. В. Способ изготовления паркетных изделий из шпона с заданным рисунком лицевого слоя // Труды БГТУ. 2015. №2: Лесная и деревообраб. пром-ть. С. 94–100.
25. Пшенов А. А., Твердохлебова С. С. Что такое ЛВЛ-брус? // Современные научные исследования и инновации. 2012. № 5. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2012/05/12341> (дата обращения: 24.02.2023).
26. Брус многослойный клееный из шпона. Технические условия: ГОСТ 33124–2014. М.: Стандартиформ, 2015. 18 с.
27. Коротков Л. И. Испытание изгибаемых элементов из клееного деревянного шпона на воздействие статической и переменной пульсирующей нагрузок // Науч. тр. ОАО ЦНИИС. 2007. Вып. 240: Науч. проблемы мостостроения. С. 22–26.
28. Коротков Л. И. Работа на выносливость изгибаемых образцов из клееного бруса // Науч. тр. ОАО ЦНИИС. 2008. Вып. 247: Науч. проблемы мостостроения. С. 20–24.
29. Коротков Л. И. Брус клееный из деревянного шпона // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2014. № 6 (185). С. 38–41.
30. ЛВЛ-брус // Ultralam. URL: <https://ultralam.com/ru/> (дата обращения: 15.02.2023).

31. Фанера бакелизированная. Технические условия: ГОСТ 11539–2014. М.: Стандартинформ, 2016. 11 с.
32. Клеефанерные деревянные конструкции // Tehlib. URL: <https://tehlib.com/stroitel-ny-e-materialy/derevyanny-e-materialy-i-izdeliya/kleefanerny-e-derevyanny-e-konstruktsii/> (дата обращения: 15.02.2023).
33. Балки перекрытий деревянные. Технические условия: ГОСТ 4981–87. М.: Стандартинформ, 1988. 6 с.
34. Клеефанерные балки // Masterbetonov. URL: <http://www.masterbetonov.ru/content/view/17992/341> (дата обращения: 15.02.2023).
35. Житушкин В. Г. Клеефанерные конструкции. М.: АСВ, 2011. 200 с.
36. Малыхина В. С., Фролов Н. В., Фам С. Х. Особенности конструирования и расчета фанерных клееных балок // Вестн. Белгород. гос. технол. ун-та им. В. Г. Шухова. 2016. № 4. С. 32–37.
37. Пинчук Е. А. К вопросу прочности фанерных стенок деревофанерных балок переменной высоты // Строительство и техногенная безопасность. 2012. № 44. С. 45–53.
38. Гнуктоклееные балки // Garden-house.ru. URL: <https://garden-house.ru/articles/gde-primenyayut-i-kak-proizvodyat-gnutye-balki-iz-kleenogo-brusa/> (дата обращения: 15.02.2023).
39. Овсянников С. И., Богданов И. И., Федоренко А. В. Экологические аспекты деревянного домостроения // Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химикотехнологические процессы защиты окружающей среды: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Белгород, 24–25 нояб. 2015 г. Белгород, 2015. Ч. II. С. 236–242.
40. Заготовки гнуктоклееные. Технические условия: ГОСТ 21178–75. М.: Стандартинформ, 2006. 12 с.
41. Склеивание шпона в технологии гнуктоклееных заготовок // Studref. URL: https://studref.com/556576/agropromyshlennost/skleivanie_shpona_tehnologii_gnutokleenyh_zagotovok (дата обращения: 15.02.2023).
42. Технология склеивания заготовок // Mebel.townevolution. URL: <http://mebel.townevolution.ru/books/item/f00/s00/z0000001/st021.shtml> (дата обращения: 15.02.2023).
43. Технология производства мебели / С. В. Шетько [и др.] Минск: РИПО, 2021. 355 с.
44. Чуйков А. С., Игнатович Л. В., Тулейко В. В. Использование аддитивных технологий для производства декоративных элементов мебели // Технология и техника лесной промышленности: тез. докл. 85-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 3 февр. 2021 г. Минск, 2021. С. 116–117.
45. Барташевич А. А. Технология производства мебели. Ростов-н/Д: Феникс, 2003. 480 с.
46. Декорирование элементов мебели и столярно-строительных изделий методом тиснения текстуры древесины и имитацией резьбы / А. А. Барташевич [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 1: Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2018. № 1. С. 197–204.
47. Кресло Марселя Брейера // Designindex. URL: <https://www.designindex.org/index/design/short-chair.html> (дата обращения: 15.02.2023).
48. Модульные системы хранения // Vurni. URL: <https://vurni.com/modular-storage-cube-systems/> (дата обращения: 15.02.2023).
49. Чуйков А. С., Игнатович Л. В. Особенности проектирования трехмерных моделей и конструкций декоративных элементов мебели и их изготовления // Труды БГТУ. Сер. 1: Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 1. С. 156–161.
50. Чуйков А. С., Игнатович Л. В., Куневич В. О. Особенности иммерсивных технологий, применяемых при проектировании // Труды БГТУ. Сер. 1: Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2022. № 1. С. 174–180.

References

1. Species composition of forests. Available at: <https://www.mlh.by/our-main-activites/forestry/forests/> (accessed 15.02.2023) (In Russian).
2. Industry of the Republic of Belfrus. Available at: <https://www.mlh.by/our-main-activites/forestry/forests/> (accessed 15.02.2023) (In Russian).
3. Balances of commodity resources of the Republic of Belarus. Available at: <https://www.mlh.by/our-main-activites/forestry/forests/> (accessed 15.02.2023) (In Russian).
4. Tuleyko V. V., Ignatovych L. V. Features of the foreign economic activity of the woodworking industry of the Republic of Belarus. *Tekhnologiya i tekhnika lesnoy promyshlennosti: tezisy dokladov 85-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Technology and Engineering of the Forestry Industry: abstracts of the 85th scientific and technical conference of the teaching staff, researches and postgraduates (with international participation)]. Minsk, 2021, pp. 133–134 (In Russian).

5. Chuikov A. S., Ignatovich L. V., Rudak O. G., Gordievich E. I. Analysis of the possibility of applying energy-saving and environmentally friendly technologies in the production of wood products. *Tekhnologiya i tekhnika lesnoy promyshlennosti: tezisy dokladov 86-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Technology and Engineering of the Forestry Industry: abstracts of the 86th scientific and technical conference of the teaching staff, researches and postgraduates (with international participation)]. Minsk, 2022, pp. 189–192 (In Russian).
6. Chuikov A. S., Shetko S. V., Ignatovich L. V., Kunevich V. O. Technology of virtual and augmented reality for spatial representation and ensuring competitiveness of products of woodworking enterprises. *Stroitel'stvo: tekhnologii i oborudovaniye. Yarmarka innovatsionnykh razrabotok* [Construction: Technologies and Equipment: Fair of innovative developments]. Minsk, 2021, pp. 12–13 (In Russian).
7. Overview of the office furniture market of the Republic of Belarus. Available at: <https://bikratings.by/wp-content/uploads/2022/02/obzor-rynka-ofisnoj-mebeli.pdf> (accessed 15.02.2023) (In Russian).
8. Volume of furniture production. Available at: <https://thinktanks.by/publication/2022/02/23/emkost-beloruskogo-rynka-ofisnoj-mebeli-budet-rasti.html> (accessed 15.02.2023) (In Russian).
9. *Programma razvitiya derevoobrabatyvayushchego i mebel'nogo proizvodstva kontserna "Bellesbumprom" na period do 2025 goda* [Development program of the woodworking and furniture production concern "Bellesbumprom" for the period until 2025]. Minsk, 2020. 70 p. (In Russian).
10. Bataev A. A., Bataev V. A. *Kompozitsionnyye materialy: stroyeniye, polucheniye, primeneniye* [Composite materials: structure, preparation, application]. Moscow, Logos Publ., 2006. 398 p. (In Russian).
11. Khudyakov V. A. *Sovremennyye kompozitsionnyye stroitel'nyye materialy* [Modern composite building materials]. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2007. 220 p. (In Russian).
12. GOST 99–2016. Cut veneer. Specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 12 p. (In Russian).
13. GOST 3916.1–2018. Plywood for general use with outer layers of deciduous veneer. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 25 p. (In Russian).
14. GOST 3916.2–2018. Plywood for general use with outer layers of coniferous veneer. Specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 28 p. (In Russian).
15. GOST 20800–75. Rotary cut veneer. Test methods. Moscow, Standartinform Publ., 1976. 7 p. (In Russian).
16. GOST 9622–2016. Glued laminated wood. Methods for determination of ultimate strength and modulus of elasticity in tension. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 10 p. (In Russian).
17. Ignatovich L. V., Skrotskiy A. I. Increasing the ecological characteristics of wood composite materials by improving the formulation of the adhesive composition. *Tekhnologiya i tekhnika lesnoy promyshlennosti: tezisy dokladov 83-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Technology and Engineering of the Forestry Industry: abstracts of the 83th scientific and technical conference of the teaching staff, researches and postgraduates (with international participation)]. Minsk, 2019, p. 44 (In Russian).
18. Bartashevich A. A., Ignatovich L. V., Korobko E. V. Constructive features of carpentry and construction products based on plywood with increased water resistance. *Tekhnologiya i tekhnika lesnoy promyshlennosti: tezisy dokladov 82-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Technology and Engineering of the Forestry Industry: abstracts of the 82th scientific and technical conference of the teaching staff, researches and postgraduates (with international participation)]. Minsk, 2018, pp. 133–134 (In Russian).
19. Ignatovich L. V., Shetko S. V., Skrotskiy A. I. Complex and rational use of veneer in the production of carpentry and construction products. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2018, pp. 54–58 (In Russian).
20. Ignatovich L. V., Shetko S. V. The technology of production of furniture and carpentry and construction products. Moscow, INFRA-M Publ., 2020. 242 p. DOI: 10.12737/1030852. (In Russian).
21. Bartashevich A. A., Ignatovich L. V., Shetko S. V., Onegin V. I. *Tekhnologiya izdeliy iz drevesiny* [Technology of wood products]. Moscow, INFRA-M Publ., 2021. 437 p. (In Russian).
22. Bartashevich A. A., Ignatovich L. V. *Materialy derevoobrabatyvayushchikh proizvodstv* [Materials of woodworking productions]. Moscow, INFRA-M Publ., 2020. 307 p. (In Russian).
23. Ignatovich L. V. Production of multi-layer parquet boards with a front layer of compacted veneer. *Derevoobrabotka: tekhnologii, oborudovaniye, menedzhment XXI veka: trudy X Mezhdunarodnogo yevraziyskogo simpoziuma* [Woodworking: technologies, equipment, management of the XXI century: Proceedings of the X International Eurasian Symposium]. Ekaterinburg, 2015, pp. 41–46 (In Russian).
24. Ignatovich L. V. The method of manufacturing parquet products from veneer with a given pattern of the face layer. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 2: Forestry and Woodworking Industry, pp. 94–100 (In Russian).

25. Pshenov A. A., Tverdokhlebova S. S. What is LVL-brus? *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii* [Contemporary scientific research and innovations], 2012. No. 5. Available at: <https://web.snauka.ru/issues/2012/05/12341> (accessed: 24.02.2023) (In Russian).
26. GOST 33124–2014. Laminated veneer lumber. Specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 18 p. (In Russian).
27. Korotkov L. I. Test of bending elements made of glued wood veneer under the influence of static and alternating pulsating loads. *Nauchnyye trudy OAO TsNIIS* [Scientific works of OJSC TsNIIS], 2007, issue 240: Scientific problems of bridge building, pp. 22–26 (In Russian).
28. Korotkov L. I. Work on the endurance of bending samples from glued beams. *Nauchnyye trudy OAO TsNIIS* [Scientific works of OJSC TsNIIS], 2008, issue 247: Scientific problems of bridge building, pp. 20–24 (In Russian).
29. Korotkov L. I. Glued wood veneer. *Stroitel'nyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka* [Construction materials, equipment, technologies of the XXI century], 2014, issue 6 (185), pp. 38–41 (In Russian).
30. LVL-brus. Available at: <https://ultralam.com/ru/> (access date 12.02.2023) (In Russian).
31. GOST 11539–2014. Bakelized plywood. Specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 11 p. (In Russian).
32. Glued plywood. Available at: <https://tehlib.com/stroitel-ny-e-materialy/derevyanny-e-materialy-i-izdeliya/kleefanerny-e-derevyanny-e-konstruktsii/> (accessed 15.02.2023) (In Russian).
33. GOST 4981–87. Wooden joists. Specifications. Moscow, Standartinform Publ., 1988. 6 p. (In Russian).
34. Glued plywood beams. Available at: <http://www.masterbetonov.ru/content/view/17992/341> (accessed 15.02.2023) (In Russian).
35. Zhitushkin V. G. *Kleyefanernyye konstruktsii* [Glued plywood constructions]. Moscow, ASV Publ., 2011. 200 p. (In Russian).
36. Malyhina V. S., Frolov N. V., Fam S. H. Features of construction and calculation of plywood beams. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova*. [Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhova], 2016, no. 4, pp. 32–37 (In Russian).
37. Pinchuk E. A. On the question of the strength of plywood walls of plywood beams of variable height. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'* [Construction and technogenic safety], 2012, no. 44, pp. 45–53 (In Russian).
38. Bent glued beams Available at: <https://garden-house.ru/articles/gde-primenyayut-i-kak-proizvodyat-gnutye-balki-iz-kleenogo-brusa> (accessed 15.02.2023) (In Russian).
39. Ovsyannikov S. I., Bogdanov I. I., Fedorenko A. V. Ecological aspects of wooden construction. *Energo- i resursosberegayushchiye ekologicheski chistyye khimikotekhnologicheskiye protsessy zashchity okruzhayushchey sredy: sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Energy- and resource-saving ecologically clean chemical-technological processes of environmental protection: Collection of reports of the international scientific and technical conference], 2015, pp. 236–242 (In Russian).
40. GOST 21178–2006. Bent Glued blanks. Specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 12 p. (In Russian).
41. Veneer gluing in the technology of bent-glued blanks. Available at: https://studref.com/556576/agropromyshlennost/skleivanie_shpona_tehnologii_gnutokleenyh_zagotovok (accessed 15.02.2023) (In Russian).
42. Technology of gluing blanks. Available at: <http://mebel.townevolution.ru/books/item/f00/s00/z0000001/st021.shtml> (accessed 15.02.2023) (In Russian).
43. Shetko S. V., Chuikov A. S., Ignatovych L. V., Uthof S. S. *Tekhnologiya proizvodstva mebeli* [Technology of furniture production]. Minsk, RIPO Publ., 2021. 355 p. (In Russian).
44. Chuikov A. S., Ignatovych L. V., Tuleyko V. V. The use of additive technologies for the production of decorative furniture elements. *Tekhnologiya i tekhnika lesnoy promyshlennosti: tezisy dokladov 85-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Technology and Engineering of the Forestry Industry: abstracts of the 85th scientific and technical conference of the teaching staff, researches and postgraduates (with international participation)]. Minsk, 2021, pp. 116–117 (In Russian).
45. Bartashevich A. A. *Tekhnologiya proizvodstva mebeli* [Technology of furniture production]. Ros-tov-on-Don, Feniks Publ., 2003. 480 p. (In Russian).
46. Bartashevich A. A., Ignatovich L. V., Shetko S. V., Hayduk S. S. Decoration of furniture elements and carpentry and construction products by the method of wood texture embossing and carving imitation. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2018, pp. 197–204 (In Russian).

47. Armchair by Marcel Breuer's. Available at: <https://www.designindex.org/index/design/short-chair.html> (accessed 15.02.2023) (In Russian).

48. Modular storage systems. Available at: <https://vurni.com/modular-storage-cube-systems/> (accessed 15.02.2023) (In Russian).

49. Chuikov A. S., Ignatovich L. V. Peculiarities of designing three-dimensional models and designs of decorative furniture elements and their manufacture. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2021, pp. 156–161 (In Russian).

50. Chuikov A. S., Ignatovich L. V., Kunevich V. O. Features of immersive technologies used in design. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2022, pp. 174–180 (In Russian).

Информация об авторах

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

Лосик Екатерина Анатольевна – аспирант кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: katerinalosik17@gmail.com

Information about the authors

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, lignatovich6@gmail.com

Losik Ekaterina Anatol'evna – PhD student, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: katerinalosik17@gmail.com

Поступила 15.03.2023

УДК 684.4.07:658.562

Е. И. Гордиевич, Л. В. Игнатович

Белорусский государственный технологический университет

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА
МЯГКОЙ МЕБЕЛИ И ОЦЕНКА ИХ ВЕСОМОСТИ**

Условия функционирования современного рынка мягкой мебели выдвигают на первый план проблему оперативного выпуска конкурентоспособных изделий, в первую очередь, за счет интенсификации производства и повышения эстетических свойств мягкой мебели, ее комфортабельности и удобства пользования ею. Такие свойства формируются в процессе создания новой модели и занимают по значимости для потребителей одно из первых мест в общей системе качества мягкой мебели (несмотря на то, что индивидуальные потребности людей очень разнообразны). Определить и оценить данные показатели можно органолептическим методом при помощи стандартных органов чувств человека: зрительных, обонятельных и слуховых. Органолептический метод применяется для определения показателей качества и мягкой мебели, так как использование данных изделий оказывает эмоциональное воздействие на потребителя.

Одной из важных проблем при определении качества мягкой мебели считается выявление весомости показателей отдельных свойств. Однако органолептические показатели и их весомость до настоящего времени разработаны недостаточно и количественно неизмеримы.

В статье изложен подход к установлению номенклатуры органолептических показателей качества мягкой мебели и определению их весомости, позволяющий решить проблему повышения качества мягкой мебели не только на стадии реализации, но и изготовления и разработки новых образцов. Для этого были использованы органолептические, экспертные методы ранжирования и непосредственной оценки, эффективность применения которых во многом зависит от компетентности оценивающих экспертов и согласованности их мнений по исследуемым вопросам.

Ключевые слова: мягкая мебель, качество, органолептические показатели, органолептический метод, экспертный метод.

Для цитирования: Гордиевич Е. И., Игнатович Л. В. Исследование органолептических показателей качества мягкой мебели и оценка их весомости // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 166–172. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-19.

E. I. Gordiyevich, L. V. Ignatovich

Belarusian State Technological University

**STUDY OF ORGANOLEPTIC QUALITY INDICATORS OF UPHOLSTERED
FURNITURE AND ASSESSMENT OF THEIR WEIGHT**

The conditions for the functioning of the modern upholstered furniture market highlight the problem of the rapid production of competitive products, primarily due to the intensification of production and increasing the aesthetic properties of upholstered furniture, its comfort and ease of use. Such properties, formed in the process of creating a new model, occupy one of the first places in terms of importance for consumers in the overall quality system of upholstered furniture (despite the fact that the individual needs of people are very diverse). These indicators can be determined and evaluated by the organoleptic method using standard organs human senses: visual, olfactory and auditory. The organoleptic method is used to determine the quality indicators of upholstered furniture, since the use of these products has an emotional impact on the consumer.

One of the important problems in determining the quality of upholstered furniture is the determination of the weight of indicators of individual properties. However, organoleptic indicators and their weightiness have not yet been sufficiently developed and are not quantitatively measurable.

The article outlines an approach to establishing the range of organoleptic quality indicators of upholstered furniture and determining their weight, which allows solving the problem of improving the quality of upholstered furniture not only at the implementation stage, but also manufacturing and developing new samples. For this, expert methods of ranking and direct evaluation were used, the effectiveness of which largely depends on the competence of the evaluating experts and the consistency of their opinions on the issues under study.

Keywords: upholstered furniture, quality, organoleptic indicators, organoleptic method, expert method.

For citation: Gordiyevich E. I., Ignatovich L. V. Study of organoleptic quality indicators of upholstered furniture and assessment of their weight. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 166–172. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-19 (In Russian).

Введение. Современный ассортимент мягкой мебели весьма разнообразен как по видам, так и по материалам и способам изготовления. Динамичное развитие рынка мебельных товаров обусловлено ростом эстетических потребностей покупателей в области формообразования, колористического решения и стилового соответствия мягкой мебели, а также функциональных и эргономических потребностей. Появление новых материалов и способов их обработки влияет на многие показатели качества мебели [1]. В связи с этим одной из важных проблем при установлении качества мягкой мебели считается определение весомости показателей отдельных свойств. В данном исследовании разработана номенклатура органолептических показателей качества мягкой мебели и определена значимость каждого из них.

Методика органолептической оценки уровня качества изделий может быть применена при проведении смотров-конкурсов однотипных изделий, а также использована работниками промышленных и торговых предприятий, которые осуществляют анализ, оценку и контроль качества изделий мягкой мебели на стадии проектирования и реализации [2].

Основная часть. Органолептические методы исследования представляют собой определение качества той или иной продукции при помощи стандартных органов чувств человека, то есть зрительных, обонятельных, осязательных [3]. Это простейшие определения, проводимые без использования приборов. Значение показателя качества выражается количественно (например, в баллах) и качественно.

На рис. 1 представлена органолептическая информация оценки качества мягкой мебели [4].

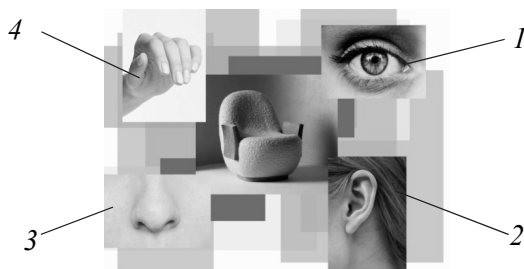


Рис. 1. Органолептическая информация:
1 – зрительная; 2 – звуковая;
3 – обонятельная; 4 – тактильная

Зрительное восприятие – это процесс, который начинается с наших глаз. Первое, на что обращает внимание потребитель, – это внешний вид

изделия. Чем красивее и эстетически совершенной будет мягкая мебель, тем выше будут ее количественные показатели.

Обонятельная информация – это информация, которую человек получает с помощью органа обоняния. Если мебель будет иметь ярко выраженный химический запах, это доставит дискомфорт потребителю. Количественный показатель снизится.

Звуковая информация – это информация, которую мы слышим. Например, присутствие скрипа пружинного блока во время использования мягкой мебели будет раздражать и мешать спать.

Тактильная информация – это информация, которую человек воспринимает наощупь. В мягкой мебели главным источником такой информации является материал обивки, мягкость и упругость мягкого элемента.

Для исследования и оценки органолептических показателей наряду с органолептическим методом был использован экспертный метод, поскольку некоторые параметры качества мягкой мебели с точки зрения органолептики не могут быть выражены в натуральном измерении. Способ экспертных комиссий позволяет получать вполне объективное усредненное мнение коллектива и также определять, какой из сравниваемых показателей самый значимый, значимый и менее значимый [5].

Порядок проведения оценки состоял в следующем:

- 1) создание экспертной группы;
- 2) составление перечня единичных органолептических показателей качества мягкой мебели и объединение их в группы;
- 3) оформление анкет и бланков для экспертов;
- 4) опрос составляющих экспертную группу лиц;
- 5) обработка полученной от экспертов информации.

Численность экспертной группы определяется необходимой точностью расчетов, а также трудоемкостью исследовательских мероприятий. Обычно она колеблется в пределах 7–20 человек. Группа не должна состоять только из представителей одной узкой специальности, так как их мнение будет тенденциозным [6, 7].

В данную экспертную группу для оценки органолептических показателей, вошло 10 человек, 7 из которых специалисты-эксперты, имеющие опыт работы в области художественного конструирования, и 3 покупателя.

Из органолептических методов самым первым был применен визуальный метод, так как общим показателем мягкой мебели является внешний вид, который предусмотрен методами контроля.

Визуально можно определить такие признаки:

- оригинальность изделия, которая проявляется в своеобразии признаков формы, выделяющих данное изделие среди других аналогичных;
- соответствие моде, т. е. признаки внешнего вида изделия, выявляющие общность временно преобладающих эстетических вкусов и предпочтений;

- колорит и декоративность, т. е. взаимосвязь цветовых сочетаний и использование декоративных свойств материалов.

На основании тактильных ощущений были выделены признаки, которые также играют важную роль при выборе и оценке качества мягкой мебели. Таким образом, путем прикосновения к источнику тактильной информации (тактильному объекту – в исследовании изделию мягкой мебели) восприняты и опознаны такие признаки:

- материал обивки. Тактильные ощущения от контакта с поверхностью различных видов мебельных тканей разные, и это безусловно сказывается на качестве мягкой мебели. Кроме тактильной информации, текстура и вид мебельной ткани добавляют живости любому пространству и создают оригинальный визуальный эффект. Таким образом, значение данного единичного показателя является результатом оценки визуальной и тактильной информации;

- эргономическая обусловленность (выявленность в форме способов и особенностей действий человека с изделием). Данный показатель оценивается удобством пользования изделием, комфортностью, наличием анатомического и ортопедического эффекта мягких элементов, который можно оценить только через тактильные ощущения;

- функционально-конструктивная обусловленность, т. е. соответствие формы мягкой мебели ее назначению, конструктивному решению, особенностям технологии изготовления и применяемым материалам, рациональности решения конструктивных элементов с точки зрения сборки и эксплуатации. Важная роль при оценке качества уделяется анализу механизма трансформации мягкой мебели. Данный показатель также оценивается не только тактильно (путем прикосновения к изделию), но и визуально.

Еще некоторые признаки были выделены на основании звуковых ощущений и обоняния. Мягкая мебель, в том числе и новая, может иметь специфический запах, что необходимо тоже учитывать при ее оценке, также, как и шум (скрип),

который может быть вызван не только длительным использованием изделия, но и применением некачественных материалов при изготовлении. Данный дефект может проявиться уже сразу после изготовления образца.

Таким образом, единичные показатели качества мягкой мебели, установленные органолептическим методом, можно объединить в следующие группы: информационная выразительность, рациональность формы и конструкции, целостность композиции и совершенство производственного исполнения.

Номенклатура органолептических показателей качества мягкой мебели приведена в табл. 1.

Таблица 1

Номенклатура органолептических показателей качества мягкой мебели

Комплексные группы показателей	Единичные показатели	Кодированное значение
Информационная выразительность	Оригинальность	X_1
	Соответствие моде	X_2
Рациональность формы и конструкции	Функционально-конструктивная обусловленность	X_3
	Эргономическая обусловленность	X_4
Целостность композиции	Колорит и декоративность	X_5
	Вид обивочного материала	X_6
Совершенство производственного исполнения	Запах	X_7
	Звук (скрип, треск)	X_8

Выбор способа обработки информации, полученной экспертами, зависит от метода экспертного оценивания – ранжирования, парного сравнения, непосредственной (балльной) оценки, последовательного сравнения [8, 9].

В работе был использован метод ранжирования, так как основными достоинствами метода является сравнительная простота процедуры получения оценок и меньшее число экспертов по сравнению с другими методами при оценке одного и того же набора признаков [9].

Ранжирование – это расположение объектов (факторов, показателей) в порядке возрастания (убывания) какого-либо присущего им свойства. Цифрой «1» обозначается наиболее важный признак, цифрой «2» – следующий за ним по важности. В нашем случае число рангов равно числу ранжируемых показателей [10].

Десять экспертов оценили 8 показателей по шкале значимости от 1 до 8. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Данные для ранжирования органолептических показателей

Единичные показатели	Ранги, присвоенные экспертами										Сумма рангов ΣS_i	Отклонение от среднего значения рангов $S_i - S_{cp}$	Среднеквадратичное отклонение $(S_i - S_{cp})^2$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
Оригинальность	8	7	8	8	4	5	5	7	7	7	66	20,8	430,6
Соответствие моде	7	8	4	7	8	7	7	8	8	8	72	26,8	715,6
Функционально-конструктивная обусловленность	5	3	2	2	1	3	2	3	2	3	26	-19,3	370,6
Эргономическая обусловленность	4	2	3	3	2	4	4	1	3	2	28	-17,3	297,6
Колорит и декоративность	1	1	1	1	3	1	1	2	1	1	13	-32,3	1040,1
Вид обивочного материала	2	4	5	6	5	2	3	4	4	4	39	-6,3	39,1
Запах	3	5	6	4	6	6	6	5	5	5	51	5,8	33,1
Шум (скрип, треск)	6	8	7	5	7	8	8	6	6	6	67	21,8	473,1
Сумма											362		3399,5

При проведении анализа собранных экспертных данных необходимо было определить согласованность действий экспертов. Согласованность мнений устанавливали с помощью коэффициента конкордации Кендалла по формуле [11]

$$W = \frac{12(S_i - S_{cp})^2}{m^2(n^3 - n)}, \quad (1)$$

где S_i – ранги, присвоенные экспертами i -му показателю качества ($i = 1, \dots, n$); S_{cp} – средняя сумма рангов; m – число экспертов; n – число показателей качества.

Средняя сумма рангов находится по формуле [11]

$$S_{cp} = \sum \frac{S_i}{n}. \quad (2)$$

Коэффициент конкордации изменяется в диапазоне $0 < W < 1$, причем 0 – полная несогласованность мнений, 1 – полное единодушие экспертов [11].

В нашем случае, подставив все значения, получили следующую величину коэффициента конкордации Кендалла:

$$W = \frac{12 \cdot 3399,5}{10^2(8^3 - 8)} = 0,81. \quad (3)$$

Значимость коэффициента конкордации была проверена с помощью критерия Пирсона «хи-квадрат», который определяется по формуле [2]

$$\chi^2 = \beta \cdot (n - 1) \cdot W; \quad (4)$$

$$n > 7,$$

где β – число экспертов; n – число показателей качества; W – коэффициент конкордации Кендалла.

Тогда

$$\chi^2 = 10 \cdot (8 - 1) \cdot 0,81 = 56,7.$$

Таким образом, полученное значение χ^2 оказалось больше, чем табличное предельное значение $\chi_{n}^2 = 14,1$ при заданном уровне значимости γ ($\gamma = 0,05$) и числе степеней свободы $\nu = n - 1$; $\nu = 8 - 1 = 7$ [2].

Таблица 3

Преобразованные ранги оценок органолептических показателей качества

Единичные показатели	Ранги, присвоенные экспертами																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10										
Оригинальность	0	1	0	0	4	3	3	1	1	1										
Соответствие моде	1	2	4	1	0	1	1	0	0	0										
Функционально-конструктивная обусловленность	3	5	6	6	7	5	6	5	6	5										
Эргономическая обусловленность	4	6	5	5	6	4	4	7	5	6										
Колорит и декоративность	7	7	7	7	5	7	7	6	7	7										
Вид обивочного материала	6	4	3	2	3	6	5	4	4	4										
Запах	5	3	2	4	2	2	4	3	3	3										
Звук (скрип, треск)	2	0	1	3	1	0	0	2	2	2										
Сумма											28	28	28	28	28	28	28	28	28	28

Поскольку $\chi^2 > \chi_n^2$, то можно дальше продолжать расчет, так как коэффициент конкордации характеризует высокую согласованность мнений экспертов [12].

Затем необходимо определить вес показателей качества, подлежащих экспертным оценкам.

На основании метода ранжирования строится матрица преобразования рангов, исходя из соотношения [13]

$$R_{ij}^* = n - R_{ij}, \quad (5)$$

где i – значение показателя качества, присвоенное j -м экспертом; n – число показателей качества.

Полученные данные занесены в табл. 3.

Коэффициент весомости показателей качества изделия был определен, исходя из условия равенства их суммы единице по формуле [14, 15]

$$K_i = \frac{\sum_{j=1}^N R_{ij}}{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n R_{ij}}, \quad (6)$$

где n – число показателей качества; R_i – ранги, присвоенные экспертами i -му показателю качества; N – количество экспертов.

Результаты расчета коэффициентов весомости представлены в табл. 4.

Значения коэффициентов весомости определяют важность органолептических показателей качества мягкой мебели по отношению друг к другу.

По результатам исследований была построена диаграмма рангов, изображенная на рис. 2.

Из диаграммы видно, что распределение равномерное, убывание значимости не монотонное

Результаты проведенного эксперимента привели к выводу о необходимости и достаточности оценки значимости органолептических показателей качества мягкой мебели.

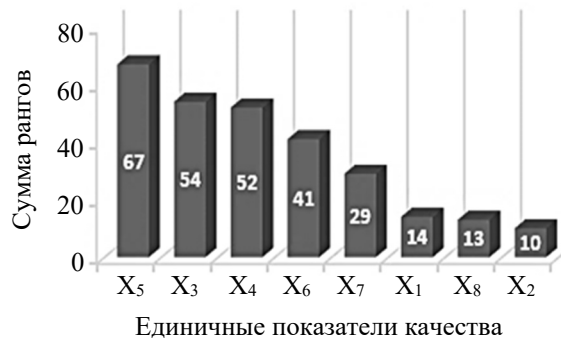


Рис. 2. Средняя априорная диаграмма рангов

Заключение. Исследование и оценка весомости органолептических показателей качества мягкой мебели показали следующее:

1) для быстрого контроля качества мягкой мебели органолептика играет важную роль;

2) проведение экспертного оценивания качества мягкой мебели по органолептическим показателям без учета их весомости существенно снижает достоверность и эффективность результата их оценки;

3) в случаях, когда весомость органолептических показателей качества мягкой мебели не поддается непосредственному измерению, для ее определения целесообразно использовать экспертные методы ранжирования и непосредственной оценки;

4) разработанная номенклатура органолептических показателей качества мягкой мебели позволит в дальнейшем производить оценку качества готовых изделий как на стадии разработки и утверждения новых моделей мебели, так и на выставках, конкурсах;

5) при оценке весомости органолептических показателей качества мягкой мебели было установлено, что самыми значимыми из них являются такие показатели, как колорит и декоративность. Это именно те показатели, на которые в первую очередь обращают внимание при выборе изделия мягкой мебели, а такой показатель как соответствие моде, оказался малозначимым.

Таблица 4

Коэффициенты весомости органолептических показателей качества мягкой мебели

Единичные показатели	Кодированное значение	Сумма рангов $\sum R_i$	Коэффициент весомости K_i	Ранг
Оригинальность	X ₁	14	0,050	6
Соответствие моде	X ₂	10	0,036	8
Функционально-конструктивная обусловленность	X ₃	54	0,193	2
Эргономическая обусловленность	X ₄	52	0,186	3
Колорит и декоративность	X ₅	67	0,239	1
Вид обивочного материала	X ₆	41	0,146	4
Запах	X ₇	29	0,104	5
Шум (скрип, треск)	X ₈	13	0,046	7
Сумма		280	1	

Важно отметить, что данные исследования проводились для оценки качества мягкой мебели массового производства. Значения весомости органолептических показателей, по которым, например,

производится оценка качества эксклюзивной (элитной) мягкой мебели, могут отличаться по важности от установленных в данной статье, но сама номенклатура показателей останется прежней.

Список литературы

1. Демакова Е. А. Факторы, формирующие ассортимент и качество мебели // Товароведение и экспертиза мебельных товаров. URL: https://bstudy.net/705057/ekonomika/factory_formiruyuschie_assortiment_kachestvo_mebeli (дата обращения: 28.02.2023).
2. Методика оценки эстетического уровня качества изделий культурно-бытового назначения. М., 1978. 91 с.
3. Органолептические методы оценки исследования и оценки качества товаров. Недостатки органолептических методов // Businessman. URL: <https://businessman.ru/new-organolepticheskie-metody-issledovaniya-i-ocenki-kachestva-tovarov-nedostatki-organolepticheskix-metodov.html> (дата обращения: 28.02.2023).
4. Органолептический метод оценки качества мягкой мебели / Л. В. Игнатович [и др.] // Лесохозяйственная секция: тез. докл. 86-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 31 янв. – 12 февр. 2022 г. Минск, 2022. С. 192–194.
5. Федоров М. В., Задесенец Е. Е. Оценка качества промышленных товаров. М.: Экономика, 1977. 110 с.
6. Методы экспертного анализа // Витебская государственная академия ветеринарной медицины. URL: <https://www.vsavm.by/knigi/kniga3/820.html> (дата обращения: 28.02.2023).
7. Показатели качества продукции. Методы оценки. Пример // Школа Инвестиционной оценки проектов, акций, бизнеса братьев Ждановых. URL: <https://finzz.ru/pokazateli-kachestva-produkcii-metody-ocenki-primer.html> (дата обращения: 01.03.2023).
8. Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Системный анализ сложных систем» // Интернет-портал. URL: https://www.ncfu.ru/export/uploads/imported-from-dle/op/doclinks2017/11_Method_SASSRLR_09.06.011.2017.pdf (дата обращения: 01.03.2023).
9. Анфилатов В. С., Емельянов А. А., Кукушкин А. А. Системный анализ в управлении. Москва: Финансы и статистика, 2002. 367 с.
10. Татарова Г. Г. Методология анализа данных в социологии. М.: NOTA BENE, 1999. 224 с.
11. Методические указания по выполнению практических работ // Ульяновский государственный университет. URL: <https://www.ulsu.ru/media/documents/> (дата обращения: 01.03.2023).
12. Евланов Л. Г., Кутузов В. А. Экспертные оценки в управлении. М.: Экономика, 1978. 133 с.
13. Мельник М. В., Поздеев М. В. Теория экономического анализа. М.: Юрайт, 2023. 238 с.
14. Назначение коэффициентов весомости показателей качества // StudFiles. URL: <https://studfile.net/preview/8870391/page:19/> (дата обращения: 01.03.2023).
15. Федоров М. В., Сомов Ю. С. Оценка эстетических свойств товаров. М.: Экономика, 1970. 207 с.

References

1. Demakova E. A. Commodity research and examination of furniture products. Available at: https://bstudy.net/705057/ekonomika/factory_formiruyuschie_assortiment_kachestvo_mebeli (accessed 28.02.2023) (In Russian).
2. *Metodika otsenki esteticheskogo urovnya kachestva izdeliy kul'turno-bytovogo naznacheniya* [Methodology for evaluating the aesthetic level of quality of products for cultural and household purposes]. Moscow, 1978. 91 p. (In Russian).
3. Organoleptic methods for evaluating research and assessing the quality of goods. Disadvantages of organoleptic methods. Available at: <https://businessman.ru/new-organolepticheskie-metody-issledovaniya-i-ocenki-kachestva-tovarov-nedostatki-organolepticheskix-metodov.html> (accessed 28.02.2023) (In Russian).
4. Ignatovich L. V., Gordiyevich E. I., Kunevich V. O., Bilash L. G. Organoleptic method for assessing the quality of upholstered furniture. *Lesokhozyaystvennaya sektsiya: tezisy dokladov 86-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhduнародным uchastiyem)* [Forestry section abstracts of the 86th scientific and technical conference of teaching staff, researchers and postgraduates (with international participation)]. Minsk, 2022, pp. 192–194 (In Russian).
5. Fedorov M. V., Zadesenets E. E. *Otsenka kachestva promyshlennykh tovarov* [Assessment of the quality of industrial goods]. Moscow, Ekonomika Publ., 1977. 110 p. (In Russian).
6. Methods of expert analysis. Available at: <https://www.vsavm.by/knigi/kniga3/820.html> (accessed 28.02.2023) (In Russian).

7. Product quality indicators. Assessment methods. Example. Available at: <https://finzz.ru/pokazateli-kachestva-produkcii-metody-ocenki-primer.html> (accessed 01.03.2023) (In Russian).

8. Guidelines for practical exercises in the discipline “System Analysis of Complex Systems”. Available at: https://www.ncfu.ru/export/uploads/imported-from-dle/op/doclinks2017/11_Method_SASSSRLR_09.06.011.2017.pdf (accessed 01.03.2023) (In Russian).

9. Anfilatov V. S., Emelyanov A. A., Kukushkin A. A. *Sistemnyy analiz v upravlenii* [System analysis in management]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2002. 367p. (In Russian).

10. Tatarova G. G. *Metodologiya analiza dannykh v sotsiologii* [Methodology of data analysis in sociology]. Moscow, NOTA BENE Publ., 1999. 224 p. (In Russian).

11. Guidelines for the implementation of practical work. Available at: <https://www.ulsu.ru/media/documents/> (accessed 01.03.2023) (In Russian).

12. Yevlanov L. G., Kutuzov V. A. *Ekspertnyye otsenki v upravlenii* [Expert assessments in management]. Moscow, Ekonomika Publ., 1978. 133 p. (In Russian).

13. Mel'nik M. V., Pozdeyev M. V. *Teoriya ekonomicheskogo analiza* [Theory of economic analysis]. Moscow, Yurayt Publ., 2023. 238 p. (In Russian).

14. Assignment of weight coefficients of quality indicators. Available at: <https://studfile.net/preview/8870391/page:19/> (accessed 01.03.2023) (In Russian).

15. Fedorov M. V., Somov Yu. S. *Otsenka esteticheskikh svoystv tovarov* [Evaluation of the aesthetic properties of goods]. Moscow, Ekonomika Publ., 1970. 207 p. (In Russian).

Информация об авторах

Гордиевич Екатерина Ивановна – ассистент кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: gordiyevich@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, lignatovich6@gmail.com

Information about the authors

Gordiyevich Ekaterina Ivanovna – assistant, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gordiyevich@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, lignatovich6@gmail.com

Поступила. 15.03.2023

УДК 685.363.2.017.3

Н. Ю. Шелемет, А. С. Чуйков

Белорусский государственный технологический университет

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ, ВНУТРЕННЯЯ КОНСТРУКЦИЯ И МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ОБЛЕГЧЕНИЯ СПОРТИВНО-БЕГОВЫХ ЛЫЖ (ОБЗОР)

Статья включает обзор конструктивных элементов и материалов современных спортивно-беговых лыж в зависимости от стиля катания и уровня подготовки спортсмена. Приведены значения массы и ширины спортивного инвентаря для спортсменов различных категорий. Также описаны требования, предъявляемые к прочности и упругости. Рассмотрены особенности эксплуатации спортивно беговых лыж, которые связаны с тем, что данный спортивный инвентарь используется в неблагоприятных условиях окружающей среды. Поэтому приведены эпюры распределения нагрузки по длине лыжи, создаваемой спортсменом во время езды классическим, коньковым или комбинированным ходом. Также представлены эпюры распределения нагрузки на спортивный инвентарь в теплую и холодную погоду. Рассмотрены основные типы конструкций, применяемые в современных спортивно-беговых лыжах: «сэндвич», КЭП и гибридная, а также основные компоненты их внутреннего строения. Кроме того, описаны способы достижения хорошего скольжения. Были выявлены преимущества, получаемые спортсменом при использовании более легкого спортивного инвентаря. Установлено, что при прочих равных условиях средний клин оказывает наибольшее влияние на массу изделия. В связи с этим проанализированы способы, материалы и основные конструкционные решения, необходимые для облегчения данного элемента. Для достижения поставленной цели возможно использование в конструкции лыжи древесины низкой плотности, изготовление полостей в материале клина, а также применение различных композиционных материалов.

Ключевые слова: лыжи, спортивно-беговые, масса, конструкция, материалы, строение, эпюра, требования, характеристики, жесткость, длина, прочность, упругость.

Для цитирования: Шелемет Н. Ю., Чуйков А. С. Особенности эксплуатации, внутренняя конструкция и материалы, применяемые для облегчения спортивно-беговых лыж (обзор) // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 173–182. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-20.

N. Yu. Shelemet, A. S. Chuikov

Belarusian State Technological University

FEATURES OF OPERATION, INTERNAL STRUCTURE AND MATERIALS USED TO LIGHTEN SPORTS-CROSS-COUNTRY SKIS (REVIEW)

The article includes an overview of the structural elements and materials of modern cross-country skiing, depending on the style of skiing and the level of training of the athlete. The values of the weight and width of sports equipment for athletes of various categories are given. The requirements for strength and elasticity are also described. The features of the operation of sports cross-country skis are considered, which are related to the fact that this sports equipment is used in unfavorable environmental conditions. In this regard, the diagrams of the load distribution along the length of the ski created by the athlete while riding a classic, skate or combined course are given. Diagrams of the distribution of the load on sports equipment in warm and cold weather are also presented. The main types of structures used in modern cross-country skiing are considered: sandwich, CAP and hybrid, as well as the main components of their internal structure. In addition, the ways of achieving a good slip are described. The advantages obtained by the sportsman when using lighter sports equipment were revealed. It was found that, all other things being equal, the average wedge has the greatest effect on the mass of the product. In this regard, the methods, materials and basic structural solutions necessary to facilitate this element are analyzed. To achieve this goal, it is possible to use low-density wood in the ski design, manufacture cavities in the wedge material, as well as the use of various composite materials.

Keywords: skis, cross-country skiing, weight, design, materials, structure, diagram, requirements, characteristics, rigidity, length, strength, elasticity.

For citation: Shelemet N. Yu., Chuikov A. S. Features of operation, internal structure and materials used to lighten sports-cross-country skis (review). *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 173–182. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-20 (In Russian).

Введение. Во всем мире лыжный спорт стал одним из самых популярных видов зимних соревнований. Он подходит практически всем, поскольку нет более доступного, столь тесно связанного с природой и настолько полезного для человека вида спорта. Появление лыж было обусловлено потребностью человека добывать на охоте пищу зимой и передвигаться по местности, занесенной снегом [1].

Лыжи появились повсеместно, где жил человек в условиях снежной зимы. Первые лыжи были ступающие. Одна из последних находок (А. М. Микляев, 1982 г.) обнаружена на территории Псковской области. По заключению специалистов, эта лыжа является одной из самых древних – сделана около 4300 лет назад [2].

Существенное развитие лыжного инвентаря началось в 70-х годах XX века. В 1974 г. произошла революция в производстве беговых лыж – появились первые пластиковые лыжи. Вскоре трассы стали готовить машинным способом, они стали шире и жестче, что в начале 80-х годов привело к появлению конькового хода, основателем которого считается знаменитый шведский лыжник Гунде Сван. В 90-х годах в производстве лыж появилась САР-технология (происходит от английского слова *sar* – «крышка»), лыжи конструкции «сэндвич» начали отходить в прошлое. На данный момент большинство современных беговых лыж состоят из среднего клина, армированного сверху оболочкой, поверхность которой может иметь трехмерную форму, а также скользящего слоя. Изменилась и геометрия лыж – она перестала быть параллельной. Компании-производители по сей день находятся в постоянном поиске оптимального профиля лыжи, а расчеты характеристик новых моделей все больше приближены к аэрокосмическим и «формульным» технологиям [3].

Беговые лыжи предназначены для перемещения по относительно ровной местности за счет использования энергии лыжника. Они позволяют передвигаться по заснеженной местности на малые и средние расстояния (до 50 км), а также длинные (до нескольких сотен километров) с высокой скоростью.

В лыжном спорте масса спортивного инвентаря является очень важным параметром для спортсмена, так как при ее уменьшении человек будет меньше уставать, сохраняя свои силы, а также с уменьшением массы лыжи, увеличивается скорость, развиваемая человеком. Вследствие чего, используя более легкий спортивный инвентарь, лыжник будет получать существенные преимущества относительно соперника, имеющего такое же снаряжение, но с большей массой [4].

В связи с этим анализ способов снижения массы спортивно-беговых лыж позволит в дальнейшем

разработать облегченную конструкцию данного спортивного инвентаря и наладить производство отечественного продукта, востребованного у спортсменов и способного конкурировать с зарубежными аналогами.

Основная часть. Современные спортивно-беговые лыжи в зависимости от стиля катания подразделяются на следующие типы [5]:

- для классического хода;
- для конькового хода;
- комбинированные;
- туристические.

Классический бег на лыжах, или классический ход, – это традиционная техника движения, с которой и началась дисциплина. Обычно классический бег заключается в ходьбе по двум параллельным колеям (лыжне). Лыжи для классического хода длиннее, чем коньковые (205–207 см). Они также имеют более длинный и острый носок и обладают жесткостью примерно в 2 раза меньшей, чем лыжи для конькового хода. Это необходимо для того, чтобы при толчке лыжи касались снега средней частью, на которой нанесены мазь держания или насечки. Благодаря их использованию лыжи не будут проскальзывать назад во время толчка. В то же время лыжи для классического хода должны обладать достаточной жесткостью, иначе во время скольжения колодки с держащей мазью или насечками будут препятствовать скольжению и тормозить лыжника [6].

Коньковый ход – один из способов перемещения на лыжах. Изначально применялся в беговых лыжах для прохождения поворотов, для подъема в гору (подъем «елочкой») и как специальное подготовительное упражнение при изучении и совершенствовании техники классического попеременного двушажного хода. Действия лыжника при передвижении коньковым ходом напоминают движения конькобежца – отсюда и пошло название хода. Коньковые лыжи отличаются от классических. Они более короткие, их максимальная длина 190–192 см, и жестче на скручивание и в продольном направлении. В отличие от классической коньковой лыжи во время толчка ногой не должна полностью касаться снега средней частью (нужный зазор 2–3 мм), иначе снижается эффективность отталкивания. Спортивный инвентарь для конькового хода можно отличить по тупому мыску [7–9].

Комбинированные лыжи предназначены для катания коньковым и классическим ходом. Они имеют максимальную длину, не превышающую 200 см. Производить комбинированные лыжи длиной более 200 см нецелесообразно, это связано с тем, что при движении коньковым ходом их пятки будут цепляться друг за друга. По своей конструкции они ближе к классическим, потому что позволяют передвигаться коньковым ходом,

в то время как на коньковых лыжах не получится перемещаться классическим ходом. Это связано с высокой жесткостью колодки (части лыжи под ботинком), вследствие чего у лыжника будет отсутствовать фаза отталкивания [10].

Туристические лыжи предназначены для лыжных походов в условиях, где нет специальных трасс. Данный спортивный инвентарь имеет усиленную конструкцию, широкую (более 59 мм) скользящую поверхность – для передвижения по бездорожью (целине). В некоторых моделях лыжи укрепляют металлическим кантом. Это сравнительно дорогой спортивный инвентарь, который проходит целый ряд специальных тестов на надежность, поскольку от их качества зависит успех похода или экспедиции, а иногда и жизнь человека [11].

По уровню подготовки спортивно-беговые лыжи подразделяют на следующие группы [12]:

- для начинающих;
- среднего уровня;
- экспертного уровня;
- для спортсменов.

Лыжи для начинающих предназначены для людей имеющих минимальный опыт катания. Их отличительные особенности – увеличенная ширина (от 45 до 59 мм) и относительно большая масса (от 1,4 до 1,7 кг). Такие лыжи универсальные и имеют сравнительно низкую стоимость. Для их удешевления применяют менее дорогие материалы, так как при их эксплуатации не требуется достижение высоких скоростей. Часто у беговых лыж начального уровня применяется колодка с насечкой «по wax» (или еще ее называют «чешуя»), которая не требует применения мази держания при передвижении классическим ходом. Такой спортивный инвентарь имеет меньшую жесткость по сравнению с лыжами для более подготовленных спортсменов. Это сделано для того, чтобы начинающий спортсмен прикладывал меньше усилий при катании [13–15].

Лыжи среднего уровня предназначены для людей, имеющих отработанные базовые навыки владения ими. Отличительной особенностью такого спортивного инвентаря является более спортивная геометрия: они имеют ширину 44–48 мм, масса составляет 1,3–1,4 кг, а их жесткость увеличена на 10–20% по сравнению с лыжами начального уровня. При их изготовлении применяют улучшенные слои скольжения и сердечники, чтобы обеспечить лыжнику возможность большей динамичной работы и более долгого скольжения в фазе толчка. Реже применяется технология «по wax». Беговые лыжи среднего уровня представлены моделями для всех стилей катания: конькового, классического и комбинированного хода [16,17].

Лыжи для экспертов предназначены для людей, имеющих хорошо поставленную и отработанную технику катания в различных условиях, а также для спортсменов в качестве тренировочного спортивного инвентаря. Они имеют низкую массу (1,1–1,3 кг) и высокую жесткость. Их изготавливают из высококачественных материалов. Стоит отметить, что среди лыж экспертного уровня нельзя встретить комбинированные, так как они – это компромисс, который не позволяет быстро двигаться ни коньковым, ни классическим ходом. Тем более в данном спортивном инвентаре не применяется технология безмазевое держания «по wax». Верхние модели экспертных лыж изготавливаются в двух вариантах жесткости, которая отличается приблизительно на 10–20%. Это делается для того, чтобы лыжник мог подобрать для себя более подходящее для него соотношение (длина лыжи / жесткость), соответствующее его уровню подготовки [18–20].

Лыжи, ориентированные на профессиональных спортсменов, обладают высокой жесткостью и предназначены для быстрой езды и участия в соревнованиях. Данный спортивный инвентарь имеет массу от 0,95 до 1,1 кг. Кроме того, что лыжи для спортсменов изготавливаются в нескольких вариантах жесткости, их исполняют в двух-трех вариантах распределения веса лыжника по длине спортивного инвентаря и в двух вариантах скользящей поверхности (для теплой и холодной погоды). Также могут применяться различные варианты структур скользящей поверхности, улучшающие прокатку в различных температурных условиях и при разных типах снега [21–23].

К спортивно-беговым лыжам предъявляются определенные требования. Они должны иметь необходимую прочность и упругость, а также устойчивость к неблагоприятным условиям окружающей среды, таким как температура и влажность. Прочность и упругость лыжи в большей степени зависят от ее конструкции и используемых материалов. Лыжа должна обладать такой упругостью, при которой она полностью выпрямится, если оказать на нее давление, создаваемое половиной массы спортсмена, т. е. на ровной площадке под весом человека скользящие поверхности спортивного инвентаря должны полностью соприкасаться со снегом [24–26].

Скользящая поверхность в современных спортивно-беговых лыжах изготавливается из АБС-пластика или полиэтилена сверхвысокой молекулярной массы UHMW-PE. Для достижения уменьшения трения о снег она не должна иметь шероховатостей, царапин, вырывов. Спортивный инвентарь не должен иметь коробления. Скользящая поверхность должна быть гладкой и тщательно отполированной. Грузовая площадка лыжи

должна располагаться таким образом, чтобы создаваемое давление приходилось больше на заднюю, укороченную часть лыжи. С одной стороны, данное решение позволяет лучше разрезать и подминать снег, а с другой – не нарушает прямолинейности скольжения, облегчая выполнение поворота [27–29].

Для участия в соревнованиях лыжи спортсменов должны соответствовать определенным требованиям: их минимальная длина должна составлять величину роста спортсмена минус 40 мм. Максимальная длина спортивного инвентаря не ограничивается. Минимальная ширина лыжи, измеренная под креплением, должна быть не менее 40 мм, максимальная также не ограничивается. Общий вес пары лыж без креплений должен быть не менее 750 г [30, 31].

Подбор оптимальных характеристик беговой лыжи обеспечивает отличное скольжение при конкретных условиях. Принято считать, что 60% скользящих свойств лыж определяются распределением нагрузки по длине (эпюрой), прогибом и жесткостью, еще 20% – материалом, состоянием и структурой скользящей поверхности, оставшиеся 20% – смазкой [32].

Эпюра показывает распределение веса человека на снег через лыжу. Она наглядно демонстрирует характеристики спортивного инвентаря, определяющие скольжение лыж в разных условиях. Их различают в зависимости от типа бега (коньковые, классические, прогулочные) и температурных условий (холодные, теплые, комбинированные). На рис. 1 показана эпюра лыж для классического хода [33].

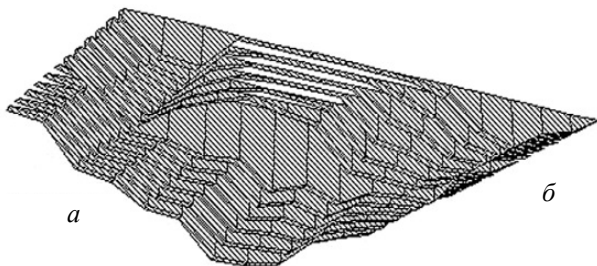


Рис. 1. Эпюра лыж для классического хода:
а – носок лыжи; б – пятка лыжи

В верхней части рисунка показано распределение давления при скольжении на двух лыжах (давление под колодкой отсутствует). В нижней части изображено распределение давления при толчке, во время которого в районе колодки спортивного инвентаря создается максимальная нагрузка на снег.

На рис. 2 представлена эпюра лыж для конькового хода [34].

Из эпюры видно, что у коньковой лыжи нагрузка распределяется по поверхности совершенно

иначе. Во время толчка (нижняя часть рисунка) она приходится на два мощных «бугра», в то время как средняя часть спортивного инвентаря при толчке почти не загружена. При прокатке (верхняя часть рисунка) давление в центральной части лыжи отсутствует.

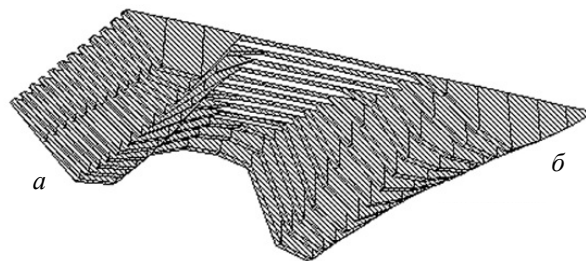


Рис. 2. Эпюра лыж для конькового хода:
а – носок лыжи; б – пятка лыжи

Поскольку комбинированные лыжи считаются универсальными, то их эпюра имеет вид, приближенный к классическому ходу. Это дает возможность использовать их для классического хода. В противном случае лыжа под колодкой не будет оказывать существенного давления на снег и будет проскальзывать при толчке [35].

Рассмотрим два основных типа эпюр в зависимости от температурных условий: COLD-эпюра, подходящая для беговых лыж в морозную погоду и лыж, имеющих меньшую жесткость, и WARM-эпюра, подходящая для теплой погоды и спортивного инвентаря, обладающего большей жесткостью. Разница COLD- и WARM-эпюр состоит в остроте пиков давления и в длине участка лыжи, который вовлечен в скольжение.

COLD-эпюра (рис. 3) имеет увеличенные по длине и более низкие по значению пики давления под передней и задней частями лыжи, вследствие чего вес спортсмена распределяется более равномерно. Благодаря этому в холодную погоду снижается действие силы сухого трения [36].

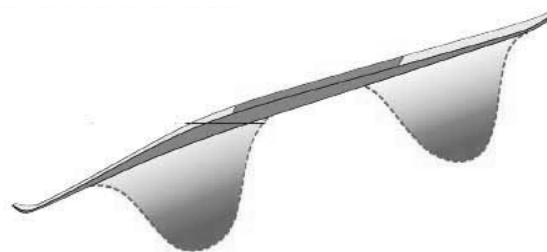


Рис. 3. Эпюра распределения нагрузки на холодной лыже (COLD)

WARM-эпюра (рис. 4) имеет уменьшенные по длине и увеличенные по значению пики давления. Такое распределение нагрузки уменьшает силу влажного трения, которое создает основное сопротивление на теплой лыже за счет уменьше-

ния площади контакта со снегом и снижения эффекта «подсасывания». На жесткой лыже WARM-эпюра предпочтительнее, так как повышается контроль лыжи за счет вдавливания поверхности лыжи в снег.



Рис. 4. Эпюра распределения нагрузки на теплой лыже (WARM)

Распространены также лыжи с комбинированной эпюрой. В ней пик давления, приходящийся на носок спортивного инвентаря, острый, а на пятке пологий. Также эпюра может иметь и промежуточные характеристики [37].

Спортивно-беговые лыжи в зависимости от материалов, из которых они изготовлены, делятся на три класса: деревянные, пластиковые и древесно-пластиковые [38].

Основные составляющие внутренней конструкции спортивно-беговой лыжи представлены на рис. 5 [39].

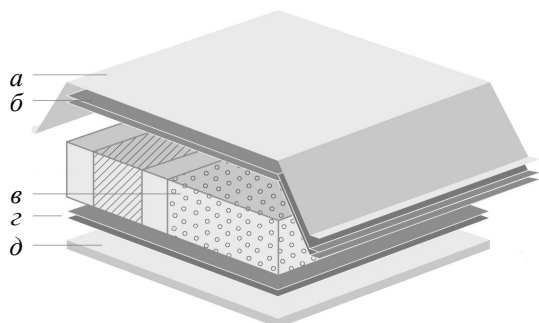


Рис. 5. Конструкция спортивно-беговой лыжи:
а – верхняя крышка; б – армирующий слой;
в – средний клин; з – склеивающий слой;
д – скользящая поверхность

Существует три основных типа внутренней конструкции спортивно-беговых лыж (рис. 6):

- «сэндвич»;
- кэп (*cap*);
- гибридная.

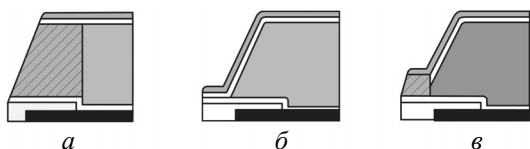


Рис. 6. Типы конструкции спортивно-беговых лыж:
а – «сэндвич»; б – кэп; в – гибридная

Конструкция «сэндвич» состоит из среднего клина из древесины или древесно-композиционного материала, который можно дополнительно армировать угле- и стекловолокном. Сверху приклеивают крышку, а боковые стенки «сэндвича» закрывают отдельным элементом из прочной породы древесины, ABS-пластика или другого армирующего материала, который выполняет защитную функцию, а также усиливает жесткость и упругость лыжи. Считается, что такая конструкция наиболее устойчива к нагрузкам [40].

В лыжах с конструкцией кэп средний клин накрывают крышкой, которая загибается на края спортивного инвентаря до канта скользящей поверхности или соединяется с ней. При таком исполнении лыжи боковые стенки являются продолжением монолитной верхней части. Такое решение позволяет уменьшить массу изделия и его стоимость. Недостатком данной конструкции является меньшая торсионная и продольная жесткость [41].

Гибридная конструкция представляет собой комбинацию первых двух вариантов. При таком исполнении центральная часть лыжи может быть выполнена по типу «сэндвича», а носок и хвост – в виде «кэпа». Для спортивного инвентаря заданной конструкции характерна средняя торсионная жесткость [42].

При прочих равных условиях существенное значение для спортивного инвентаря имеет средний клин. Именно различия в материалах и конструкциях этого элемента влияют на вес и физико-механические показатели спортивно-беговых лыж. В связи с этим для снижения их веса главное внимание нужно уделить способам облегчения среднего клина.

Основным материалом, из которого изготавливается средний клин, является древесина различных пород: ясень, клен, тополь, осина, бальса, а также композиционные материалы на их основе. Одним из путей снижения массы клина является выборка материала, которую можно осуществлять в продольном, поперечном направлении или под углом. Удалять материал можно на высоту всего элемента или на определенную величину (рис. 7). Для того чтобы выяснить, какой из способов позволит уменьшить массу среднего клина, при этом сохранив показатели прочности и упругости на должном уровне, необходимо провести дополнительные исследования [43, 44].

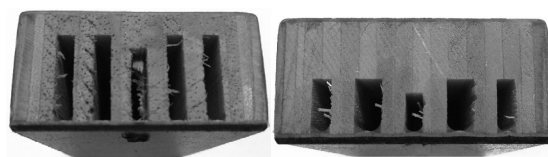


Рис. 7. Пример средних клиньев из древесины с воздушными каналами различной высоты

Еще одним способом уменьшения массы лыжи является использование в ее конструкции в качестве среднего клина древесины низкой плотности – бальсы, которая составляет 120–160 кг/м³. Физико-механические свойства данной древесины неоднородны. В свежесрубленном виде бальса содержит до 95% воды, она очень тяжелая, однако быстро теряет влажность после валки дерева и дальнейшей усушки. В краже у комля и в ядре древесина плотная и довольно крепкая. Плотность может доходить до 0,3 г/см³. Молодая заболонь очень легкая, с плотностью 0,1 г/см³ [45, 46].

Кроме того, можно комбинировать древесину различных пород, располагая ее в среднем клине слоями поочередно или в определенной последовательности, используя более прочный материал, например древесину клена, в одном слое и более мягкий (бальсу) в другом, соединяя между собой с помощью клея и образуя тем самым облегченный композиционный материал, обладающий новыми свойствами.

Производители спортивного инвентаря достигают высоких показателей механических и эксплуатационных свойств, сохраняя при этом легкость изделия. Как правило, это происходит за счет использования композиционных многокомпонентных материалов, состоящих из древесной основы (матрицы), армированной наполнителями из волокон, сотовых пласт, вспененных материалов, нитевидных кристаллов, тонкодисперсных частиц и др. Подбирая состав, свойства наполнителя и матрицы, а также их соотношение и ориентацию, можно получить материалы с требуемым сочетанием эксплуатационных и технологических характеристик. Свойства полученного в результате объединения материала сильно отличаются от свойств его компонентов по отдельности [47].

Рассмотрим несколько вариантов композиционных материалов для облегчения среднего клина.

В качестве наполнителя в таких материалах используют сотовые пласти – анизотропные материалы, свойства которых зависят от исходных компонентов, толщины, размеров и структуры получаемых ячеек, направления приложения нагрузки. Они обладают высокой прочностью при сжатии и сдвиге. Сотовая структура представляет собой тип ячеистых материалов с регулярными и периодически повторяющимися наборами ячеек различной формы, образованных между тонкими вертикальными стенками. Ячейки в основном имеют шестиугольную форму или расположены в виде столбцов. Жесткость сотовых конструкций позволяет использовать меньше материала и снизить массу. Сотовые материалы широко применяются для изготовления плоских и изогнутых поверхностей. Сотовые пласти могут за-

нимать как всю высоту среднего клина, так и его определенную величину (рис. 8) [48].

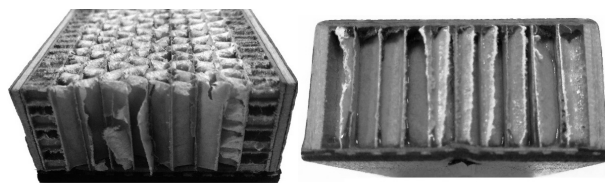


Рис. 8. Пример средних клиньев, изготовленных с применением сотовых наполнителей

Для изготовления сотовых наполнителей используют различные виды материалов:

- картон;
- алюминий;
- нержавеющую сталь;
- арамид;
- кевлар;
- термопластики.

Наполнителем в композиционном материале, позволяющем облегчить конструкцию спортивного инвентаря, могут также выступать вспененные материалы (пенопласты, поропласты) [49].

В качестве вспененного материала при изготовлении среднего клина могут применять пенополиуретан – это синтетическое вещество ячеистой структуры из группы газонаполненных пластмасс. По сути, пенополиуретан можно охарактеризовать как разновидность пластмассы. Основным сырьем, используемым для получения пенополиуретана, являются ди- и триизоцианаты и полиолы. Другие технологические добавки вводятся для изменения свойств полимера [50].

Все способы и материалы, описанные выше, применяемые для уменьшения массы среднего клина можно комбинировать между собой для того, чтобы достигнуть наилучшего результата.

Заключение. В зависимости от условий эксплуатации существует несколько типов спортивно-беговых лыж, каждому из которых присущи определенные особенности. Кроме того, к ним предъявляются различные требования, которые также зависят от уровня подготовки спортсмена. Одним из важнейших параметров в лыжах является их масса, которая в большей степени зависит от внутренней конструкции и материалов, используемых для изготовления среднего клина. Для снижения веса данного элемента могут применяться различные конструктивные решения и композиционные материалы на основе древесины. Однако необходимо учесть, что некоторые из них могут оказывать негативное влияние на физико-механические свойства лыжи, например, уменьшают ее жесткость. На основании сказанного выше, дальнейшее комбинирование и создание новых композиционных материалов позволит разработать конструкцию и технологию производства

облегченных спортивно-беговых деревопластиковых лыж с сохранением основных физико-механических свойств на требуемом уровне, а так-

же снизить нагрузку на спортсменов, что в свою очередь, позволит обеспечить достижение более высоких спортивных результатов.

Список литературы

1. Триченков В. А., Манкевич О. А. Лыжный спорт в Республике Беларусь. Могилев: МГУ им. А. А. Кулешева, 2016. 100 с.
2. Лыжный спорт // Wikipedia. URL: https://ru.wikipedia.org/Лыжный_спорт (дата обращения: 27.02.2023).
3. История беговых лыж: от истоков и до наших дней // RedBull. URL: <https://www.redbull.com/ru-ru/skiing-history> (дата обращения: 27.02.2023).
4. Беговые лыжи // Wikipedia. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Беговые_лыжи_спорт (дата обращения: 27.02.2023).
5. Полховский А. В., Прохорчик С. А., Шетько С. В. Современные конструкции и материалы для лыж // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2019. № 1 (216). С. 169–175.
6. Обзор: типы и характеристики беговых лыж // Горные вершины. URL: <https://mountainpeaks.ru/reviews/begovye-lyzhi/on-the-types-and-characteristics-of-the-cross-country-ski-trail/> (дата обращения: 27.02.2023).
7. Газизов В. Г. Лыжный спорт: все о коньковом ходе. Казань: Казан. гос. ун-т, 2018. 105 с.
8. Коньковый ход // Wikipedia. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Коньковый_ход (дата обращения: 27.02.2023).
9. Разница коньковых и классических лыж // AIRFIT. URL: <https://airfit.ru/classicorskate> (дата обращения: 27.02.2023).
10. Особенности комбинированных лыж // VPLATE. URL: <https://vplate.ru/lyzhi/kombinirovannye> (дата обращения: 27.02.2023).
11. Конструктивные особенности туристических лыж // Спорт-Марафон. URL: <https://sport-marafon.ru/article/kak-vybrat-turisticheskie-lyzhi> (дата обращения: 27.02.2023).
12. Классификация и особенности беговых лыж // Барс. URL: <https://bars.su/articles/klassifikatsiya-i-osobennosti-begovykh-lyzh/> (дата обращения: 27.02.2023).
13. Как выбрать беговые лыжи // Спортмастер. URL: https://www.sportmaster.ru/media/articles/11560563/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F (дата обращения: 27.02.2023).
14. Лыжи. Технические условия: ГОСТ 17043–1990. М.: Из-во стандартов, 1990. 16 с.
15. Аналитический метод расчета на жесткость и прочность спортивно-беговой пластиковой лыжи / А. Л. Наркевич [и др.] // Полимерные материалы и технологии. 2021. Т. 7, № 2. С. 72–79.
16. Основные критерии выбора беговых лыж // Клуб. URL: <https://ozon.by/club/article/osnovnyye-kriterii-vybora-begovykh-lyzh-5022/> (дата обращения: 27.02.2023).
17. Как выбрать беговые лыжи // FIVESPORT.RU. URL: <https://www.five-sport.ru/blogs/stati-i-obzory/kak-vybrat-begovye-lyzhi-sovety-dlya-novichkov> (дата обращения: 27.02.2023).
18. Виды и стили катания на беговых лыжах // Prokatstyle. URL: <https://prokatstyle.ru/vidy-begovih-lyzh> (дата обращения: 27.02.2023).
19. Классические беговые лыжи // СПОРТДЕПО. URL: https://www.sportdepo.ru/catalog/begovye-lyzhi/ekipirovka/lyzhi-begovye/lyzhi-klassicheskie/?PAGEN_1=1 (дата обращения: 27.02.2023).
20. How to Choose the Right Equipment for Cross-Country Skiing // Sportsexperts. URL: <https://www.sportsexperts.ca/en-CA/blog/training-tips/Cross-Country-Skiing> (дата обращения: 27.02.2023).
21. Коротко о беговых лыжах // КАНТ. URL: <https://www.kant.ru/articles/390999/> (дата обращения: 27.02.2023).
22. Как выбрать беговые лыжи // Спортмастер, 2023. URL: <https://www.sportmaster.ru/media/articles/37020381> (дата обращения: 27.02.2023).
23. Cross-country skiing (sports) // Wikipedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cross-country_skiing_\(sport\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Cross-country_skiing_(sport)) (дата обращения: 27.02.2023).
24. Полховский А. В., Прохорчик С. А. Основные требования, предъявляемые к спортивно-беговым лыжам. Методика испытаний лыж // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2020. № 1. С. 174–178.
25. Cross-country skis – Determination of mass and location of balance point: ISO 7138:2017. Standards Publishing, 2017. 8 p.
26. Cross-country skis – Determination of elastic properties: ISO 7139:2017. Standards Publishing, 2017. 10 p.

27. Что такое структура скользящей поверхности // СпортивнаяЛиния. URL: https://skiline.ru/sport-technology/1264-what_is_the_structure_of_the_sliding_surface_of_the_ski (дата обращения: 27.02.2023).
28. Ducret S. Friction and abrasive wear of UHMWPE sliding on ice // *Wear*. 2005. No. 258 (1-4). P. 26–31.
29. Леонид Кузьмин. Поверхностное трение скольжения лыж: природа, пути и методы его улучшения // *Ski Service*. URL: <https://www.service4ski.ru/poverhnochnoe-trenie-skolzheniya-lyzh-priroda-puti-i-metody-ego-uluchsheniya/> (дата обращения: 27.02.2023).
30. Лыжи для соревнований // Судебные и нормативные акты РФ. URL: https://sudact.ru/law/pravila-vida-sporta-strelba-iz-luka-utv/prilozhenie-a/3_4/3.1_2/3.1.1/ (дата обращения: 27.02.2023).
31. Лыжи. Определение массы и положения центра тяжести: ГОСТ 30199–94. М.: Изд-во стандартов, 1995. 7 с.
32. Классификация беговых лыж // Спорт-лидер.рф. URL: <http://sportleader.ru/article2.php> (дата обращения: 27.02.2023).
33. Лыжи для любителей // *Ski.ru*. URL: <https://www.ski.ru/az/blogs/post/lyzhi-dlya-lyubitelei/> (дата обращения: 27.02.2023).
34. Жесткость лыж фишер // *Yogagorod*. URL: <https://yogagorod.ru/zhestkost-lyzh-fisher-tablica-konkovyi-vse-o-cifrah-na-lyzhah-fischer/> (дата обращения: 27.02.2023).
35. Идеальная эюра коньковых лыж // *Лыжный спорт*. URL: <https://www.skisport.ru/forum/cross-country/77195/> (дата обращения: 27.02.2023).
36. Все о цифрах на лыжах Fischer: структуры, эюры, HR, FA, SVZ // *Training365*. URL: <https://training365.ru/vse-o-cifrah-na-lyzhah-fischer/> (дата обращения: 27.02.2023).
37. Отличия классических, коньковых и комбинированных беговых лыж // *ПроДвиж*. URL: <https://prodvizh.com/articles/razlichiya-lyzh> (дата обращения: 27.02.2023).
38. Разработка конструкции облегченных спортивно-беговых пластиковых лыж / А. В. Полховский [и др.] // *Нефтехимия – 2020: материалы III Междунар. науч.-техн. форума по хим. технологиям и нефтегазоперераб.*, Минск, 2–3 дек. 2020 г. Минск, 2020. С. 164–167.
39. Конструкции беговых лыж Fischer, Atomic и Salomon // *ЮВЕНТАСПОРТ*. URL: https://www.uventasport.ru/contents/view/konstrukcii_begovyh_lyzh_fischer_atomic_i_salomon (дата обращения: 27.02.2023).
40. Строение горных лыж или что такое конструкции сайдвол (Sidewall) и кэп (cap) // *YOURSKI.RU*. URL: <https://www.yourski.ru/article/stroenie-gornykh-lyzh-ili-chto-takoe-konstrukcii-saydvoll-sidewall-i-ker-cap> (дата обращения: 27.02.2023).
41. Типы и характеристики беговых лыж и техники передвижения // *Дзен*. URL: <https://dzen.ru/a/YSu-AvSZGCIaKKh> (дата обращения: 27.02.2023).
42. *Ski construction* // *OutdoorGearExchange*. URL: <https://www.gearx.com/blog/knowledge/skiing/ski-construction/> (дата обращения: 27.02.2023).
43. Жук О. С. Конструкция среднего клина облегченной спортивно-беговой лыжи и технология его производства с применением методов аддитивного синтеза // *Тез. докл. 73-й науч.-техн. конф. учащихся, студентов и магистрантов*, Минск, 18–23 апр. 2022 г.: в 4 ч. Ч. 2. Минск, 2022. С. 275.
44. Лыжи // *Wikipedia*. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Лыжи> (дата обращения: 27.02.2023).
45. Бальза // *WOODSTOCK*. URL: https://www.woodstock.su/porody-drevesiny/balza_balsa (дата обращения: 27.02.2023).
46. Бальса // *Wikipedia*. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Бальса> (дата обращения: 27.02.2023).
47. Бондалетова Л. И., Бондалетов В. Г. Полимерные композиционные материалы (часть 1): Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2013. 118 с.
48. Гиясов Б. И., Серегин Н. Г., Серегин Д. Н. Трехслойные панели из полимерных композиционных материалов. М.: Изд-во АСВ, 2015. 64 с.
49. Сотопласты // *StudRef*. URL: <https://studref.com/687172/stroitelstvo/sotoplasty> (дата обращения: 27.02.2023).
50. Harris J. K., Rumack B. H., Aldrich F. D. Toxicology of urea-formaldehyde and polyurethane foaminsulation // *J. am Med. Assoc.* 1981. No. 245 (3). P. 243–246.

References

1. Trichenkov V. A., Mankevich O. A. *Lyzhnyy sport v Respublike Belarus* [Skiing in the Republic of Belarus]. Mogilev, Kuleshev Mogilev State University Publ., 2016. 100 p. (In Russian).
2. Skiing. Available at: https://ru.wikipedia.org/Лыжный_спорт (accessed 27.02.2023) (In Russian).
3. History of cross-country skiing: from the origins to the present day. Available at: <https://www.redbull.com/ru-ru/skiing-history> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
4. Cross-country skiing. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Беговые_лыжи_sport (accessed 27.02.2023) (In Russian).

5. Polkhovsky A. V., Prokhorchik S. A., Shetko S. V. Modern constructions and materials for skis. *Trudy BGTU [Proceedings of BSTU]*, issue 1, Forest Management. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2019, no.1 (216), pp. 169–175 (In Russian).
6. Review: types and characteristics of cross-country skiing. Available at: <https://mountainpeaks.ru/reviews/begovye-lyzhi/on-the-types-and-characteristics-of-the-cross-country-ski-trail/> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
7. Gazizov V. G. *Lyzhnyy sport: vse o kon'kovom khode* [Skiing. All about skating]. Kazan, Kazanskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2018. 105 p. (In Russian).
8. Skating. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Skate_hod (accessed 27.02.2023) (In Russian).
9. The difference between skate and classic skis. Available at: <https://airfit.ru/classicorskate> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
10. Features of combined skis. Available at: <https://vplate.ru/lyzhi/kombinirovannye> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
11. Design features of tourist skis. Available at: <https://sport-marafon.ru/article/kak-vybrat-turisticheskie-lyzhi> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
12. Classification and features of cross-country skiing. Available at: <https://bars.su/articles/klifikatsiya-i-osobennosti-begovykh-lyzh/> (accessed 02.27.2023) (In Russian).
13. How to choose cross-country skis. Available at: https://www.sportmaster.ru/media/articles/11560563/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F (accessed 27.02.2023) (In Russian).
14. GOST 17043–1990. Skiing. Technical specifications. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1990. 16 p. (In Russian).
15. Narkevich A. L., Polkhovsky A. V., Shetko S. V., Prokhorchik S. A. Analytical method for calculating the stiffness and strength of a sports-running plastic ski. *Polimernyye materialy i tekhnologii* [Polymer materials and technologies], 2021, vol. 7, no. 2, pp. 72–79 (In Russian).
16. Basic criteria for choosing cross-country skis. Available at: <https://ozon.by/club/article/osnovnye-kriterii-vybora-begovykh-lyzh-5022> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
17. How to choose cross-country skis. Available at: <https://www.five-sport.ru/blogs/stati-i-obzory/kak-vybrat-begovye-lyzhi-sovety-dlya-novichkov> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
18. Types and styles of cross-country skiing. Available at: <https://prokatstyle.ru/vidy-begovykh-lyzh/> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
19. Classic cross-country skiing. Available at: https://www.sportdepo.ru/catalog/begovye-lyzhi/ekipirovka/lyzhi-begovye/lyzhi-klassicheskie/?PAGE_1=1 (accessed 27.02.2023) (In Russian).
20. How to choose the right equipment for cross-country skiing. Available at: <https://www.sportsexperts.ca/en-CA/blog/training-tips/Cross-Country-Skiing> (accessed 27.02.2023).
21. Briefly about cross-country skiing. Available at: <https://www.kant.ru/articles/390999> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
22. How to choose cross-country skis. Available at: <https://www.sportmaster.ru/media/articles/37020381> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
23. Cross-country skiing (sport). Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cross-country_skiing_\(sport\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Cross-country_skiing_(sport)) (accessed 27.02.2023).
24. Polkhovsky A. V., Prokhorchik S. A. The main requirements for cross-country skiing. Ski testing methodology. *Trudy BGTU [Proceedings of BSTU]*, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2020, no. 1, pp. 174–178 (In Russian).
25. ISO 7138:2017. Cross-country skiing – Determination of the mass and location of the equilibrium point. Standards Publishing, 2017. 8 p.
26. ISO 7139:2017. Cross-country skiing – Determination of elastic properties. Standards Publishing, 2017. 10 p.
27. What is the structure of the sliding surface. Available at: <https://skiline.ru/sport-technology/1264-what-is-the-structure-of-the-sliding-surface-of-the-ski> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
28. Ducret S. Friction and abrasive wear of UHMWPE sliding on ice. *Wear*, 2005, no. 258 (1-4), pp. 26–31.
29. Leonid Kuzmin. Surface friction of ski sliding: nature, ways and methods of its improvement. Available at: <https://www.service4ski.ru/poverhnostnoe-trenie-skolzheniya-lyzh-priroda-puti-i-metody-egouluchsheniya/> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
30. Skiing for competitions. Available at: https://sudact.ru/law/pravila-vida-sporta-strelba-iz-luka-utv/prilozhenie-a/3_4/3.1_2/3.1.1 (accessed 27.02.2023) (In Russian).
31. GOST 30199–94. Skiing. Determination of the mass and position of the center of gravity. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1995. 7 p. (In Russian).
32. Classification of cross-country skiing. Available at: <http://sportleader.ru/article2.php> (accessed 27.02.2023) (In Russian).

33. Skiing for amateurs. Available at: <https://www.ski.ru/az/blogs/post/lyzhi-dlya-lyubitelei> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
34. Rigidity of fischer skis. Available at: <https://yogagorod.ru/zhestkost-lyzh-fisher-tablica-konkovyi-vse-o-cifrah-na-lyzhah-fischer> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
35. The ideal plot of skating skis. Available at: <https://www.skisport.ru/forum/cross-country/77195> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
36. All about figures on Fischer skis: structures, plots, HR, FA, SVZ. Available at: <https://training365.ru/vse-o-cifrah-na-lyzhax-fischer> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
37. Differences of classic, skating and combined cross-country skiing. Available at: <https://prodvizh.com/articles/razlichiya-lyzh> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
38. Polkhovsky A. V., Prokhorchik S. A., Shetko S. V., Ruchkina E. V. Constructions of lightweight sports and cross-country plastic skis Development. *Neftekhimiya – 2020: materialy III Mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo foruma po khimicheskim tekhnologiyam i neftegazopererabotke* [Petrochemistry – 2020: materials of the III International Scientific and Technical Forum on Chemical Technologies and Oil and Gas Processing]. Minsk, 2020, pp. 164–167 (In Russian).
39. Designs of cross-country skis Fischer. Atomic and Salomon. Available at: https://www.uventasport.ru/contents/view/konstrukcii_begovyh_lyzh_fischer_atomic_i_salomon (accessed 27.02.2023) (In Russian).
40. The structure of mountain skis or what is the sidewall (Side wall) and cap (lid) structures. Available at: <https://www.yourski.ru/article/stroenie-gornyx-lyzh-ili-chto-takoe-konstrukcii-saydvol-sidewall-i-kep-cap> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
41. Types and characteristics of cross-country skis and movement techniques. Available at: <https://dzen.ru/a/YCu-AvSZGCIAKKKh> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
42. Ski construction. Available at: <https://www.gearx.com/blog/knowledge/skiing/ski-construction/> (accessed 27.02.2023).
43. Zhuk O. S. The design of the middle wedge of lightweight cross-country skiing and the technology of its production using methods of additive synthesis. *Tezisy dokladov 73-y nauchno-tehnicheskoy konferentsii uchashchikhsya, studentov i magistrantov* [Abstracts of 73rd scientific-technical conference of students, undergraduates and undergraduates]. Minsk, 2022, part 2, p. 275 (In Russian).
44. Skiing. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Лыжа> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
45. Balsa. Available at: https://www.woodstock.su/porody-drevesiny/balza_balsa (accessed 27.02.2023) (In Russian).
46. Balsa. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Бальса> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
47. Bondaletova L. I., Bondaletov V. G. *Polimernyye kompozitsionnyye materialy (chast' 1)* [Polymer composite materials (part 1)]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2013. 118 p. (In Russian).
48. Giyasov B. I., Seregin N. G., Seregin D. N. *Trekhsloynnyye paneli iz polimernykh kompozitsionnykh materialov* [Three-layer panels made of polymer composite materials]. Moscow, ASV Publ., 2015. 64 p. (In Russian).
49. Sotoplasts. Available at: <https://studref.com/687172/construction/sotoplastika> (accessed 27.02.2023) (In Russian).
50. Harris J. K., Rumak B. H., Aldrich F. D. Toxicology of urea-formaldehyde and polyurethane foam insulation. *J. am Med. Assoc.*, 1981, no. 245 (3), pp. 243–246.

Информация об авторах

Шелемет Никита Юрьевич – аспирант кафедры технологии дизайна и изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: nikitashelemet88@gmail.com

Чуйков Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой 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

Shelemet Nikita Yurievich – PhD student, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nikitashelemet88@gmail.com

Chuikov Aleksey Sergeevich – PhD (Engineering), Head of 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 20.03.2023

УДК 684.4:004.928

А. С. Чуйков¹, В. О. Куневич¹, О. Г. Рудак¹, В. В. Сиваков²¹Белорусский государственный технологический университет²Брянский государственный инженерно-технологический университет,
Российская Федерация**АНИМАЦИЯ ПОДВИЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕБЕЛИ В УСЛОВИЯХ
ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЫ**

Основным направлением развития конструирования мебели является внедрение систем автоматизирования проектирования с разработкой трехмерной модели готового изделия, что позволяет сократить продолжительность постановки изделий на производство и повысить качество получаемой продукции. Использование современных инновационных технологий виртуальной и дополненной реальности позволит усилить взаимодействие потребителя и производителя и вывести эти отношения на новый качественный уровень. Внедрение разработанных систем и программных продуктов будет способствовать сокращению продолжительности проектирования изделий из древесины и древесных материалов, снижению затрат материальных ресурсов на производство прототипов, повышению конкурентоспособности отечественной продукции. Исследование процессов анимации объектов виртуальной реальности позволяет улучшить восприятие качественных характеристик продукции деревообрабатывающих производств потребителями. Рассмотренные в статье способы добавления интерактивности элементам мебели в условиях виртуальной среды позволяют улучшить пользовательский опыт при взаимодействии с продуктом. Проанализирована и описана траектория кинематического перемещения деталей мебели, описаны особенности работы технологии дополненной реальности, которая предлагает более совершенный пользовательский интерфейс для визуализации объектов мебели, более естественные способы управления виртуальными моделями в различных масштабах, реалистичное отображение анимации в реальном пространстве.

Ключевые слова: анимация, визуальное программирование, виртуальная среда, дополненная реальность.

Для цитирования: Чуйков А. С., Куневич В. О., Рудак О. Г., Сиваков В. В. Анимация подвижных элементов мебели в условиях виртуальной среды // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 183–192. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-21.

A. S. Chuikov¹, V. O. Kunevich¹, O. G. Rudak¹, V. V. Sivakov²¹Belarusian State Technological University²Bryansk State Technology University of Engineering, Russian Federation**ANIMATION OF MOVING FURNITURE ELEMENTS IN CONDITIONS
VIRTUAL ENVIRONMENT**

The main direction of furniture design development is the introduction of computer-aided design systems with the development of a three-dimensional model of the finished product, which reduces the duration of putting products into production and improves the quality of the products. The use of modern innovative technologies of virtual and augmented reality will strengthen the interaction between the consumer and the manufacturer and bring these relations to a new qualitative level. The introduction of developed systems and software products will help to reduce the duration of the design of wood products and wood materials, reduce the cost of material resources for the production of prototypes, increase the competitiveness of domestic products. The study of the processes of animation of virtual reality objects makes it possible to improve the perception of the qualitative characteristics of woodworking products by consumers. The methods of adding interactivity to furniture elements in a virtual environment considered in the article allow to improve the user experience when interacting with the product. The trajectory of the kinematic movement of furniture parts is analyzed and described, the features of the augmented reality technology are described, which offers a more advanced user interface for visualizing furniture objects, more natural ways to control virtual models at various scales, realistic animation display in real space.

Keywords: animation, visual programming, virtual environment, augmented reality.

For citation: Chuikov A. S., Kunevich V. O., Rudak O. G., Sivakov V. V. Animation of moving furniture elements in conditions virtual environment. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 183–192. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-21 (In Russian).

Введение. В Республике Беларусь в общей структуре деревообрабатывающей промышленности основную роль играет мебельное производство, доля которого составляет около 70% объема выпуска продукции данной отрасли. Кроме того, в структуре экспортируемых товаров также преобладает мебель (49,1%) [1].

На сегодняшний день развитие мебельной промышленности предполагает введение современных цифровых технологий в процесс проектирования изделий, которые в значительной степени могут упрощать, сокращать и даже исключать некоторые этапы проектирования [2].

Особенностью современного процесса производства мебели является внедрение систем автоматизирования с разработкой трехмерной модели готового изделия, что позволяет сократить время на проектирование и повысить качество получаемой продукции. Использование современных инновационных технологий виртуальной (Virtual Reality, далее – VR) и дополненной (Augmented Reality, далее – AR) реальности способствуют сокращению продолжительности проектирования изделий из древесины и древесных материалов, позволяет совершенствовать конструкции и технологии производства продукции без вовлечения в процесс материальных ресурсов, обеспечивает мобильность и доступность демонстрации готовых изделий в виртуальной среде, что не только повышает конкурентоспособность, но и вызывает интерес потребителей к продукции деревообрабатывающих производств [3].

Обращает на себя внимание тот факт, что особенностью работы в VR является сочетание знаний не только в области программирования и компьютерной графики, но и в области конструирования и технологии производства мебели и изделий из древесины [4].

Целью данного исследования являлось создание траекторий кинематических перемещений подвижных деталей мебельного изделия в условиях виртуальной среды.

Основная часть. Весь процесс трехмерного моделирования в условиях виртуальной среды можно разделить на два основных этапа:

- построение трехмерной модели объекта;
- создание анимации подвижных элементов мебели.

Для создания анимации подвижных элементов мебели в условиях виртуальной среды необходимо сочетание знаний как в области программирования, так и в компьютерной графике. Помимо этого, требуются умения создавать и импортировать трехмерные модели, программировать их интерактивность.

VR позволяет пользователю взаимодействовать с окружающими его объектами. Правильная репликация реальных движений элементов

мебели их виртуальными прототипами значительно усиливает эффект погружения.

В настоящее время существует метод «фреймворк», который принимает на вход видео и моделирует перемещения, имитирующие движение элементов мебели либо подвижных узлов изделия. Подход основан на оценке положения деталей изделия в кадрах видео, которые позднее используются для восстановления движения и его имитации.

Исходное видео обрабатывается на этапе анализа положения детали в пространстве, где для этой операции в каждом кадре применяются вычисленные оценки 2D- и 3D-позы. Далее множество предложенных позиций отправляется на этап восстановления движения, где траектория перемещения точек объекта оптимизирована таким образом, что она согласуется как с 2D-, так и с 3D-предсказаниями положения и соблюдает временное соответствие между кадрами [5].

Предлагаемый подход показывает хорошие результаты для переноса анимации из одного входящего видео в виртуальную среду. Объединение методов оценки позиций подвижных элементов, восстановления координат позиции деталей в пространстве позволяет перенести движения в режим анимации с высокой точностью [6].

Для разработки анимации подвижных элементов мебели в условиях виртуальной среды программного обеспечения были рассмотрены следующие принципы анимации [7]:

- 1) прототипирование;
- 2) сжатие и растяжение;
- 3) сценичность;
- 4) подготовка или отказное движение;
- 5) использование «прямо вперед» и «от позиции к позиции»;
- 6) сквозное движение (или доводка) и захлест действия;
- 7) смягчение начала и завершения движения;
- 8) дуги;
- 9) дополнительное действие;
- 10) привлекательность;
- 11) расчет времени;
- 12) профессиональный рисунок.

Принцип 1: прототипирование. Сложные объекты в сцене должны состоять из базовых форм, например цилиндр, сфера, куб. Прототип позволяет проработать все механики и анимации в сцене, не затрачивая большое количество ресурсов на обработку геометрической формы объектов.

Принцип 2: сжатие и растяжение. Эта техника позволяет преувеличивать движение элементов объекта в нужном направлении.

Объекты из мягких материалов при движении, как правило, деформируются. Этот принцип применим к любым движущимся предметам из мягких материалов – пластик, резина, ткань и т. д.

Однако для таких материалов, как древесина, металл, сжатие и растяжение не характерны. Например, поднимающийся вверх объект может быть в быстрой фазе поднятия растянута вертикально, чтобы подчеркнуть направление движения, но сжат в верхней точке.

Принцип 3: сценичность. Этот принцип необходим для управления вниманием зрителя. Указать пользователю на ключевые моменты в сцене можно с помощью композиции, фона, масштаба, ракурса. Такие приемы, как расположение объекта в центре, необычный ракурс и крупный размер, привлекут внимание к важным частям этой сцены.

Для этого требуется работа с камерой и композицией изделия. Очень часто управлять вниманием пользователя позволяет освещение. Аниматор может продумывать дизайн, чтобы оптимальным образом располагать сцены в поле зрения с помощью подобных техник.

Принцип 4: подготовка или отказное движение. Отказное движение используется для подготовки анимации объекта к действию. Оно позволяет отобразить передачу энергии действия, которую само действие отразит не в состоянии. Практически все реальные движения в большей или меньшей степени содержат подготовку или отказное движение – открывание фасада шкафчика, выдвижного ящика и т. д., когда сначала мы вдавливаем фасад внутрь корпуса, после чего происходит основное движение фасада.

Принцип 5: «прямо вперед» и «от позиции к позиции». Эти две техники относятся исключительно к процессу создания анимации и описывают разницу между непрерывной работой над кадрами (начиная с кадра 1 и далее вперед) и добавлением только ключевых позиций (это называется *blocking*) для быстрого создания первого прохода с его дальнейшим развитием.

Анимация «прямо вперед» начинается с первого положения тела в пространстве и последовательно доводится до конца сцены. При таком способе объект может утратить точку опоры, пропорции и размер.

Метод «от позиции к позиции» считается наиболее спланированным, с четко расставленными ключевыми положениями предмета в пространстве.

В компьютерной анимации необходимость в первом подходе отсутствует, а большую результативность можно получить, выполняя работу в несколько проходов с постепенным улучшением качества. Поэтому для большинства анимаций предпочтительным методом является движение от позиции к позиции. В основном это вызвано тем, что велика вероятность изменения или даже вырезания анимаций в процессе создания дизайна.

Принцип 6: сквозное движение (или доводка) и захлест действия. Захлест движения учитывает свойство перемещения разных частей подвижных узлов изделия с разной частотой.

Доводка описывает происходящее после действия. Она может относиться к таким действиям, как закрытие фасада или задвигание ящика на направляющих. Также в нее входит движение вторичных элементов: подъемные и выдвижные механизмы и их составляющие части. Доводка – это отличный способ передачи веса объекта. Удерживание точных позиций в этой фазе действий очень помогает аниматору лучше считать перемещения.

С принципом доводки и захлеста действия связана концепция «запаздывания», которая позволяет более свободным объектам отставать от основной массы и габаритов изделия, передавая вес одного объекта или части деталей относительно другого. Доводку, захлест движения и запаздывание неанимированных объектов можно создавать процедурно с помощью добавления трехмерных опор, позволяющих этим элементам двигаться в соответствии с физикой.

Принцип 7: смягчение начала и завершения движения. Этот принцип описывает визуальный результат ускорения и замедления подвижных элементов: в общем случае действия обычно имеют медленное движение вначале и в конце, и часто это вызвано весом объекта или отдельной подвижной детали.

Важно также то, что не всем объектам нужно смягчение начала и завершения движения. Объекты (подвижные узлы и детали мебели), мгновенно набирающие полную скорость, могут выглядеть невесомыми и нереалистичными. Мгновенно поднимающийся фасад может казаться легким, поэтому задача аниматора – добавить этот вес в конце доводки, придавая действию быстрое начало, но замедленное завершение, когда деталь возвращается в состояние ожидания.

Принцип 8: дуги. Большинство действий при движении объекта естественным образом происходят по дуге: например, открывание распашных фасадов корпусной мебели. Детали изделия, отклоняющиеся от естественной кривой, будут замечаться глазом и казаться неестественными, поэтому дуги – это отличный способ достижения качества и правильности действия. Основная часть подчистки захвата движения заключается в устранении самых заметных отклонений от дуг, естественным образом возникающих при движении детали, но кажущихся слишком заметными и «неправильными» при многократных повторениях.

Однако если при анимировании каждого элемента мебели все его части будут следовать

по четким дугам, то это может выглядеть слишком легковесным. Как и в случае с захлестами, необходимо знание о том, когда нужно разрушить плавную дугу, чтобы добавить еще один уровень деталей, повышающий реализм анимации.

Принцип 9: дополнительное действие. Дополнительные действия используются, чтобы дополнить и подчеркнуть основное действие движения соединительного узла, добавить базовому действию деталей и визуальной привлекательности. Из-за краткости многих анимаций в них сложно добавить несколько действий (дополнительные действия должны подкреплять, а не размывать основное действие), именно такие мелкие детали могут превратить хорошую анимацию в отличную.

Принцип 10: привлекательность. Привлекательность должна быть основной целью каждого аниматора, работающего с подвижными узлами мебели (открыть, закрыть, выдвинуть, задвинуть и т. д.). Это правдоподобность действий по сравнению с нереалистичностью и автоматизмом.

Пропорции, оттенки цветов и четкость текстуры – первые этапы процесса создания, стремящегося сделать анимацию 3D-модели мебели как можно более привлекательной. Простота визуального дизайна и позиций, созданные аниматором, способствуют читаемости движения, а четкие силуэты позволяют отличать детали и узлы друг от друга.

Принцип 11: расчет времени. Расчет времени – важнейший элемент «ощущения» анимации и обычно он используется для передачи веса объекта. Время неразрывно связано со скоростью: расстояние или угол поворота, проходимые подвижным узлом или деталью за единицу времени, дают зрителю ощущение о весе или мощи движения. В 3D-анимации лучше всего это объяснить простой математикой: $\text{время} = \text{расстояние} / \text{скорость}$, следовательно, $\text{скорость} = \text{расстояние} / \text{время}$.

Именно поэтому во всех редакторах анимации на осях откладываются расстояние и время как основные параметры, визуализирующие скорость выполняемых манипуляций. Если мы перемещаем объект на 10 м за 2 с, то это быстрее, чем перемещение на то же расстояние за 5 с.

Наряду со смягчением начала и завершения движения расчет времени обеспечивает подчинение 3D-модели мебели законам физики: чем быстрее движение, тем меньше вес, и наоборот.

Принцип 12: профессиональный рисунок. Детальная прорисовка – это важный способ передачи информации об объекте.

Принцип «профессиональный рисунок» можно интерпретировать и как профессиональное понимание механик тела: от понимания центра масс и равновесия до цепочки реакций по каждому моменту движения элемента мебели.

Наравне с вышеописанными методами создания анимации, существуют сторонние, менее распространенные способы, которые зависят от содержания и условий реализации проекта. Примером таких условий является проект для виртуальной реальности, реализуемый в условиях программного обеспечения – Unreal Engine. Данное программное обеспечение дает возможность использовать как стандартные сценарии анимации подвижных объектов, так и задействовать скриптовую анимацию, реализуемую с помощью визуального языка программирования – Blueprint.

Скрипт (сценарий) – это последовательность действий, описанных с помощью скриптового языка программирования (JavaScript, PHP, Perl, Python и др.) для автоматического выполнения определенных задач [8].

Скриптовые языки тесно связаны со многими сферами деятельности, такими как веб-дизайн, игровая индустрия, легкая и тяжелая промышленности и др., и используются для автоматизации операций. Также существуют скриптовые языки программирования, заточенные под их написание, – так называемые «языки сценариев». Сценарии – другое название скриптового языка.

Стремление визуализировать скриптовые языки проявлялось человеком давно, практически одновременно с появлением понятия «алгоритм». Понятие алгоритма – одно из основных в программировании и информатике. Это – последовательность команд, предназначенная исполнителю, в результате выполнения которой он должен решить поставленную задачу. Алгоритм должен описываться на формальном языке, исключающем неоднозначность толкования [9].

VPL (visual programming language) означает язык визуального программирования, который использует графические компоненты, такие как значки, кнопки и символы, в качестве способа разработки IT-продуктов. Этот язык позволяет визуально проиллюстрировать программный код, помогает пользователям без технических знаний в области разработки воспринимать графику и процессы таким образом, что понятен большинству новичков. Визуальный язык программирования также позволяет пользователям просто использовать интерфейс drag-and-drop (захват и перемещение) [10, 11].

Благодаря интеграции технологии разработки приложений и визуального программирования, в настоящее время происходит трансформация привычного эстетического понимания выразительных средств анимации, оказавшихся в мире виртуальных технологий и подвергающихся значительным преобразованиям. Тем не менее технологии создания виртуальной реальности и погружение аниматора в эту среду дают возможность

для экспериментирования визуального искусства в виртуальных средах. Цель этих экспериментов – производство анимационных произведений с более высоким уровнем передачи эмоций зрителю за счет полного погружения в созданную автором реальность.

После того как объекты смоделированы и отмасштабированы, анализируется процесс движения элементов мебели, после чего это движение описывается математически.

Для более точного прототипирования движения фасадов рассмотрим изменение угла вращения фасада с шагом 22° , представленного на рис. 1. Угол открывания фасада равен 110° .

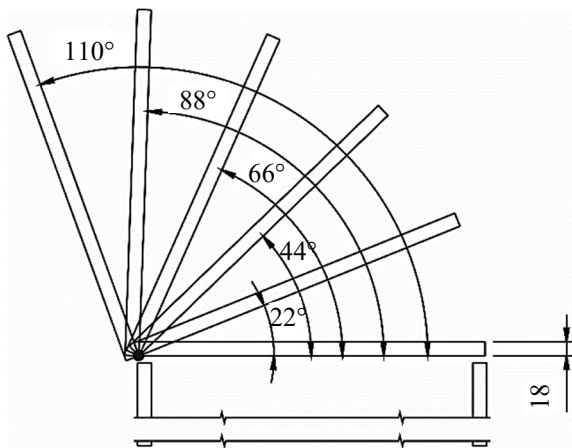


Рис. 1. Изменение угла поворота фасада при его открывании

Проведенные исследования показали, что фасад с установленной фурнитурой Blum производит полный оборот на угол 110° по зависимости, представленной на рис. 2.

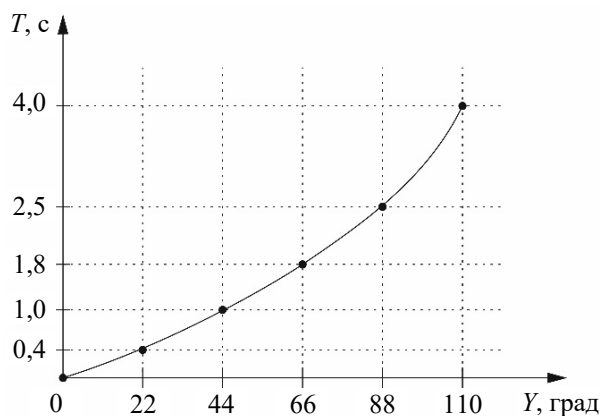


Рис. 2. График зависимости изменения положения фасада (Y) в пространстве с течением времени (T)

Данная зависимость показывает изменение угла поворота фасада Y от времени T, затрачиваемого на полное открывание.

Существуют различные способы наделяния интерактивностью виртуальных объектов, которые зависят от условий реализации проекта. Примером таких условий является использование программного обеспечения Unreal Engine. Данное ПО дает возможность использовать как стандартные сценарии анимации подвижных объектов, так и задействовать скриптовую систему, реализуемую с помощью визуального языка программирования – Blueprint.

Blueprint – визуальный скриптовый язык, который позволяет написать логику без применения основ программирования. Проект состоит из узлов (nodes), которые соединены линиями передачи данных. Каждый узел может представлять функцию, событие, оператор и т. д. [12].

Скриптинговая система Blueprint позволяет импортировать ранее полученные зависимости в программное обеспечение виртуальной реальности при помощи функции Timeline. Она помогает запрограммировать движение виртуального объекта, используя график зависимости изменения угла от времени.

Для создания анимации на примере фасадов (ящиков) кухонной мебели были выполнены следующие действия:

1. Выбрав правой кнопкой мыши подвижный элемент – шкаф-пенал, необходимо создать Blueprint из меню. Работая с элементом, можно дублировать, поворачивать его, при этом сценарии анимации будут работать корректно. В созданный Blueprint можно добавлять и другие составные части одного объекта. Данные изменения можно вносить на вкладке Viewport.

2. После объединения всех элементов в единый объект взаимодействие происходит с подвижным фасадом. Необходимо добавить объем перекрытия охватывающего фасада через Add Component, который будет действовать как триггер (элемент формы, при соприкосновении с которым будет воспроизводиться анимация объекта).

3. В разделе Event Graph следует выбрать в настройках коллизии (пространство, окружающее объект и не допускающее пересечения его другими элементами) узел On Component Begin Overlap, который позволяет запустить имитацию движения объекта, как только один из контроллеров попадет в область коллизии. Добавляя функцию Get Player Controller и подключая ее к слоту Player Controller, мы указываем, какой объект должен попасть в зону коллизии для проигрывания анимации, как показано на рис. 3.

4. FlipFlop – это переключатель, который при первом вызове функции запускает ветку A, при следующем вызове – ветку B. Для первой ветки в нашем случае будет воспроизводиться анимация движения, соответствующего открытию фасада или выдвиганию ящика. Далее задаются

параметры изменения положения анимируемого объекта в пространстве с течением времени в соответствии с графиком, представленным на рис. 2. После открытия узла Timeline создается пустой график в зависимости от изменения угла поворота заданной точки на анимируемом объекте и от времени с помощью Float Track.

На координатное поле добавляются точки управления. Чем больше точек будет добавлено на интерактивный график, тем точнее будет воспроизводиться движение объекта. Данные параметры являются диапазоном перемещения фасада во времени. После создания Timeline необходимо вызвать функцию Set Relative Rotation, которая анимирует движение фасада по заданному графику.

5. Из раздела Components в область графиков перенесем объект, анимацию которого осуществляем. Объединим образовавшийся узел со слотом Target функции Set Relative Rotation. Подключая слот Timeline под названием DoorRotation к узлу Set Relative Rotation, мы получаем замкнутую систему, как показано на рис. 4.

Для создания реалистичных, имитирующих натурные действия узлов и элементов мебели применяются различные методы компьютерной анимации. Технология создания виртуальной реальности дает возможность имитировать визуальное искусство в виртуальной среде.

В настоящее время альтернативой виртуальной реальности является новая инновационная

технология, которую называют дополненной реальностью (AR, Augmented Reality), подчеркивая таким образом ее связь с реальным окружением.

Дополненная реальность – результат введения в поле восприятия дополнительных виртуальных данных с целью расширения сведений об окружающем мире. Она называется также смешанной реальностью (MR, или Mixed Reality), основанной на создании сложной модели, в которой главной является реальность окружающего мира, а визуальное моделирование дополняет и уточняет эту реальность.

Концепция AR может интерпретироваться как прямой или косвенный взгляд на физическую реальную среду, элементы которой дополняются компьютерным сенсорным вводом, таким как звук, видео, графика. В результате технология улучшает текущее восприятие реальности [13].

Дополненная реальность представляет собой модель реальности, которая хранится в базе данных в виде послыонного визуального отображения карт в различных масштабах, а также отдельных трехмерных объектов. Карты дополненной реальности при необходимости создают одну смешанную разных масштабов для детального изучения отдельных виртуальных фрагментов. Можно описать AR как сложную информационную систему, которая выполняет следующие основные функции: совмещает виртуальное и реальное; взаимодействует в реальном времени; работает с трехмерными моделями.

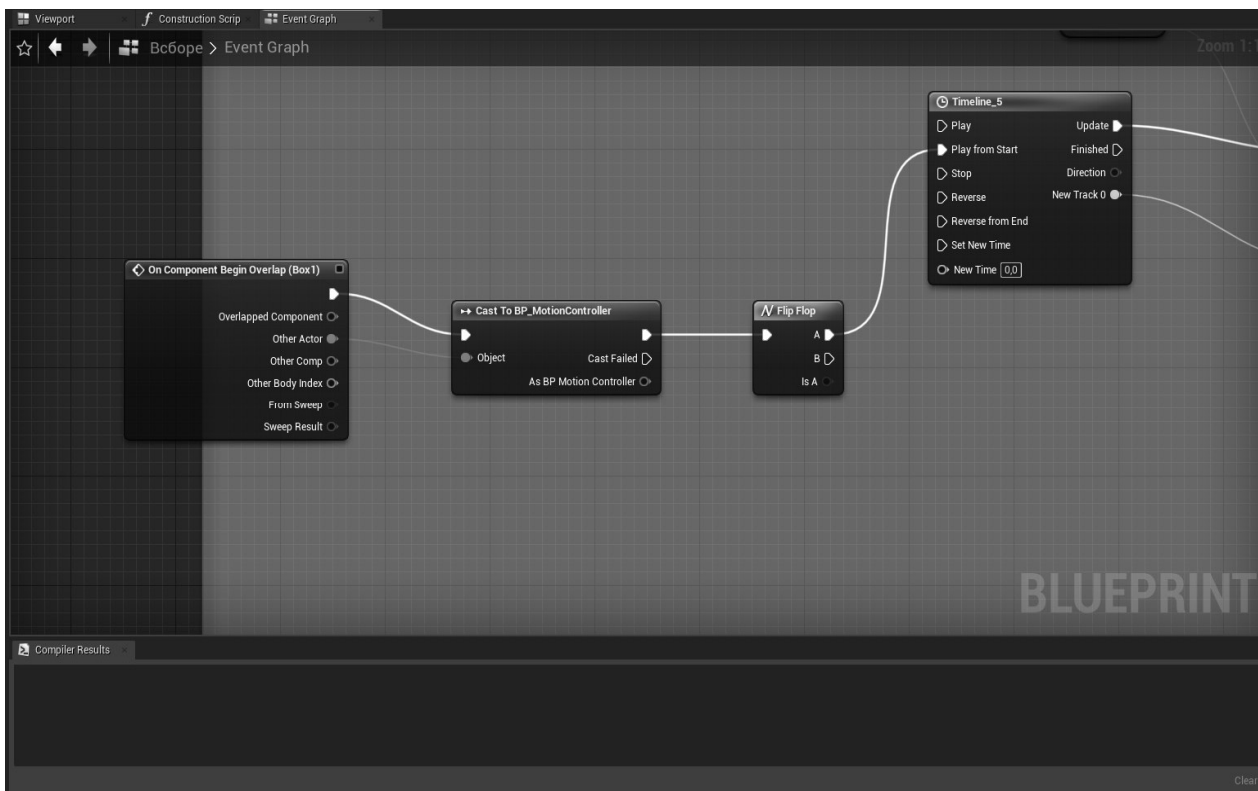


Рис. 3. Скриншот интерфейса настроек узла FlipFlop

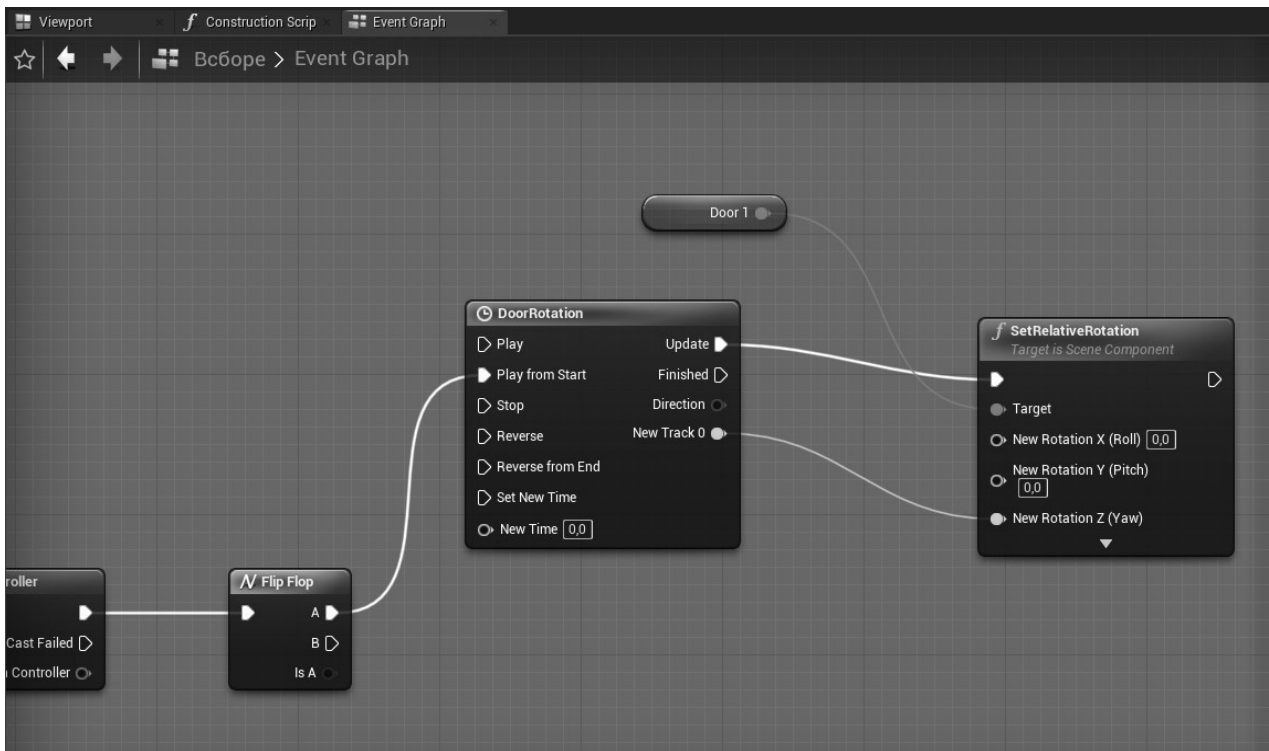


Рис. 4. Скриншот интерфейса подключения функции Rotation к ветке Timeline

В системах дополненной реальности компьютер анализирует воспринимаемые визуальные и другие данные, чтобы синтезировать и позиционировать виртуальные объекты. Программное обеспечение AR выводит координаты реального мира независимо от изображений, передаваемых камерой оборудования. Этот процесс называется регистрацией изображений, он использует различные методы компьютерного зрения, в основном связанные с видеоотслеживанием. Системы дополненной реальности находят применение в

образовании, медицине, коммерции, архитектуре и др. [14].

Виртуальная информация в AR-технологии может отображаться на устройствах, напоминающих очки, представленные на рис. 5.

Моноэкранный, или головной дисплей (head-mounted display, HMD), представляет собой устройство отображения, или шлем. Технология данного шлема размещает изображения реального мира и виртуальных объектов в поле зрения пользователя.



Рис. 5. Изображение применяемого оборудования для использования дополненной реальности

Подобные очки применяют в виртуальной реальности. Технология AR включает очки, в которые внедрены камеры для видеозахвата реального мира и проецирования виртуальных объектов через окуляры и устройства, в которых AR-образные изображения отражаются от поверхностей частей линз очков [15].

Большинство очков оснащено функцией распознавания голоса и движений, поэтому ими можно управлять при помощи голосовых команд, специальных манипуляторов и жестов рук. Изображения проецируются на линзы очков или специальные мини-дисплеи, в связи с этим нет необходимости в дополнительных метках для генерации контента.

Заключение. В результате выполнения поставленной цели установлено, что для создания реалистичных, имитирующих натурные действия узлов и элементов мебели, применяются различные методы компьютерной анимации. Технология создания виртуальной реальности дает возможность для экспортирования визуального искусства в виртуальную среду.

Анимация подвижных элементов мебели с применением визуального языка программирова-

ния предполагает наличие специализированного оборудования (шлем и контроллеры), с помощью которого достигается эффект полного погружения в созданную автором реальность.

Применение виртуальных моделей изделий мебели в производственных условиях позволяет в процессе проектирования избежать непосредственного изготовления экспериментального образца и, соответственно, снизить затраты как на материалы, из которых изготовлено изделие, так и на работу специализированного оборудования.

Также в ходе рассмотрения технологии дополненной реальности был сделан вывод о том, что она предлагает более совершенный пользовательский интерфейс для визуализации объектов мебели за счет послойного визуального отображения карт в различных масштабах, а также естественных способов управления виртуальными моделями и визуализации в реальном пространстве.

Таким образом, более детальное исследование технологии дополненной реальности и дальнейшее внедрение ее в реальный сектор экономики будет способствовать цифровизации деревообрабатывающих предприятий Республики Беларусь.

Список литературы

1. Производство мебели // Белорусский производственно-торговый концерн лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности. URL: <http://www.bellesbumprom.by/ru/derevoobrabatyvayushchie-i-mebelnye-proizvodstva> (дата обращения: 22.02.2023).
2. Чуйков А. С., Куневич В. О., Игнатович Л. В. Особенности иммерсивных технологий, применяемых при проектировании мебели // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2022. № 1 (252). С. 174–180.
3. Технология виртуальной и дополненной реальности для пространственного представления и обеспечения конкурентоспособности продукции деревообрабатывающих предприятий / А. С. Чуйков [и др.] // Строительство: технологии и оборудование: Ярмарка инновационных разработок, Минск, 18 марта 2021 г. Минск, 2021. С. 12–13.
4. Чуйков А. С., Тулейко В. В., Игнатович Л. В. Использование аддитивных технологий для производства декоративных элементов мебели // Технология и техника лесной промышленности: тез. докл. 85-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 3 февр. 2021 г. Минск, 2021. С. 116–117.
5. Ричард Уильямс. Аниматор: набор для выживания. Секреты и методы создания анимации, 3D-графики и компьютерных игр. М.: Бомбора, 2019. 392 с.
6. Ричард Уильямс. Самоучитель 3ds Max 2020. М.: Бомбора, 2019. 544 с.
7. High-Fidelity Facial and Speech Animation for VR HMDs // ACM Trans. Graph. 2016. Vol. 35, no. 6. Article 221.
8. Скрипт // ИМБА. URL: <https://imba.ru/glossary/skript-10> (дата обращения: 05.03.2023).
9. Архитектурная визуализация в Unreal Engine 4 // Habr. URL: <https://habr.com/ru/post/253503/> (дата обращения: 05.03.2023).
10. Лоспинозо Д. С++ для профи. СПб.: Питер, 2021. 816 с.
11. Макеффри М. Unreal Engine VR для разработчиков. М.: Эксмо, 2019. 256 с.
12. Unreal Engine 5 Documentation // Epic Games. URL: <https://docs.unrealengine.com/4.27/en-US/> (дата обращения: 03.03.2023).
13. Kangdon Lee. Augmented Reality in Education and Training // Techtrends: Linking Research & Practice to Improve Learning, 2012. P. 56.
14. Рынок дополненной реальности в России и в мире // Джейсон энд Партнерс Консалтинг. URL: http://www.json.ru/poleznye_materialy/free_market_watches/analytics/rynok_dopolnenoj_realnosti_i_geolokacionnyh_servisov_v_rossii_i_mire/ (дата обращения: 22.02.2023).

15. Кравцов А. А. Использование технологии дополненной реальности для визуализации виртуального объекта в реальном интерьере // Политемат. сетевой электрон. науч. журн. Кубан. гос. аграр. ун-та 2012. № 10 (084). С. 724–733.

References

1. Furniture manufacture. Available at: <http://www.bellesbumprom.by/ru/derevoobrabatyvayushchie-i-mebelnye-proizvodstva> (accessed 22.02.2023) (In Russian).
2. Chuikov A. S., Kunevich V. O., Ignatovich L. V. Features of immersive technologies applied in furniture design. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2022, no. 1 (252), pp. 174–180 (In Russian).
3. Chuikov A. S., Shetko S. V., Ignatovich L. V., Kunevich V. O. Virtual and augmented reality technology for spatial representation and ensuring the competitiveness of woodworking enterprises' products. *Stroitel'stvo: Tekhnologii i oborudovaniye: Yarmarka innovatsionnykh razrabotok* [Construction: Technologies and equipment: Fair of innovative developments]. Minsk, 2021, pp. 12–13 (In Russian).
4. Chuikov A. S., Tuleyko V. V., Ignatovich L. V. The use of additive technologies for the production of decorative elements of furniture. *Tekhnologiya i tekhnika lesnoy promyshlennosti: tezisy dokladov 85-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Technology and Engineering Section timber industry: abstracts of the 85th Scientific and technical conference of the teaching staff, researches and postgraduates (with international participation)]. Minsk, 2021, pp. 116–117 (In Russian).
5. Richard Williams. *Animator: nabor dlya vyzhivaniya. Sekrety i metody sozdaniya animatsii, 3D-grafiki i komp'yuternykh igr* [Animator: survival kit. Secrets and methods for creating animation, 3D graphics and computer games]. Moscow, Bombora Publ., 2019. 392 p. (In Russian).
6. Richard Williams. *Samouchitel' 3ds Max 2020* [Tutorial 3ds Max 2020]. Moscow, Bombora Publ., 2019. 544 p. (In Russian).
7. Olszewski K., Lim J., Saito S., Li H. High-Fidelity Facial and Speech Animation for VR HMDs. *ACM Trans. Graph*, 2016, vol. 35, no. 6, article 221.
8. Skript. Available at: <http://www.bellesbumprom.by/ru/derevoobrabatyvayushchie-i-mebelnye-proizvodstva> (accessed 05.03.2023) (In Russian).
9. Architectural rendering in Unreal Engine 4. Available at: <https://habr.com/ru/post/253503/> (accessed 05.03.2021) (In Russian).
10. Lospinozo D. *C++ dlya profi* [C++ for the pros]. St. Petersburg, Piter Publ., 2021. 816 p. (In Russian).
11. Makeffrey M. *Unreal Engine VR dlya razrabotchikov* [Unreal Engine VR for Developers]. Moscow, Eksmo Publ., 2019. 256 p. (In Russian).
12. Unreal Engine 5 Documentation. Available at: <https://docs.unrealengine.com/4.27/en-US/> (accessed 03.03.2023).
13. Kangdon Lee. Augmented Reality in Education and Training. *Techtrends: Linking Research & Practice to Improve Learning*, 2012, p. 56.
14. The augmented reality market in Russia and in the world. Available at: http://www.json.ru/poleznye-materialy/free_market_watches/analytics/rynok_dopolnennoj_realnosti_i_geolokacionnyh_servisov_v_rossii_i_mire/ (accessed 22.02.2023) (In Russian).
15. Kravtsov A. A. Using augmented reality technology to visualize a virtual object in a real interior. *Politematicheskij setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University], 2012, pp. 724–733 (In Russian).

Информация об авторах

Чуйков Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: offlex88@mail.ru, offlex88@belstu.by

Куневич Валерия Олеговна – младший научный сотрудник кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: leruse@bk.ru

Рудак Оксана Геннадьевна – магистр 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: oksrudak@mail.ru

Сиваков Владимир Викторович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Транспортно-технологические машины и сервис». Брянский государственный инженерно-технологический университет (241037, г. Брянск, пр. Станке Димитрова, 3, Российская Федерация). E-mail: sv@bgitu.ru

Information about the authors

Chuikov Aleksey Sergeevich – PhD (Engineering), Head of 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, offlex88@belstu.by

Kunevich Valeria Olegovna – Junior Researcher, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: leruse@bk.ru

Rudak Oksana Gennadijevna – Master of 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: oksrudak@mail.ru

Sivakov Vladimir Viktorovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Professor the Department of Transport and Technological Machines and Service. Bryansk State Technological University of Engineering (3, Stanke Dimitrova Ave., 241037, Bryansk, Russian Federation). E-mail: sv@bgitu.ru

Поступила 20.03.2023

УДК 674.04.047.3

О. Г. Рудак

Белорусский государственный технологический университет

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ТЕХНОЛОГИИ НАЧАЛЬНОГО ПРОГРЕВА ДРЕВЕСИНЫ В НЕНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЕ (ОБЗОР)

В статье приводятся результаты аналитического обзора научной литературы по вопросам технологии начального прогрева древесины в ненасыщенной среде перед конвективной сушкой. Анализ результатов научных исследований в области технологии сушки древесины свидетельствует о наличии фундаментальных знаний в области тепломассопереноса, что является основной теоретической базой для моделирования тепловых процессов в период прогрева, а также прогнозирования динамики изменения свойств пиломатериалов. Отмечено, что переход на новый вид теплоносителя, кардинальное изменение вида ограждающих конструкций лесосушильных камер повлекли за собой изменение технологии проведения начального прогрева древесины в среде ненасыщенного влагой воздуха. Большинство предприятий деревообрабатывающей отрасли Республики Беларусь перешло на использование более дешевого и простого в эксплуатации теплоносителя – горячей воды, что предполагает проведение операции начального прогрева при степени насыщенности среды φ на уровне 0,80–0,85 ($\Delta t = 2,5–3,5$). Сделан вывод об отсутствии на сегодняшний день единого подхода к технологии начального прогрева в ненасыщенной среде. С целью повышения технико-экономической эффективности процесса прогрева древесины предлагается разработать математическую модель определения продолжительности данной операции; установить характер и величину внутренних напряжений в древесине; рассчитать расход энергии для различных условий нагревания; определить влияние технологических факторов на величину перепадов температуры и влажности древесины при прогреве; изучить характер изменения тепловых свойств древесины во времени в нестационарных условиях; выявить закономерности изменения температуры и влажности пиломатериала во времени в период прогрева в ненасыщенной среде.

Ключевые слова: начальный прогрев, теплоноситель, тепломассоперенос, технология, сушка, древесина, продолжительность.

Для цитирования: Рудак О. Г. Современные представления о технологии начального прогрева древесины в ненасыщенной среде (обзор) // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 193–203. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-22.

O. G. Rudak

Belarusian State Technological University

CURRENT UNDERSTANDING OF THE TECHNOLOGY OF INITIAL HEATING OF WOOD IN AN UNSATURATED ENVIRONMENT (REVIEW)

The article presents the results of an analytical review of the scientific literature on the technology of initial heating of wood in unsaturated medium before convective drying. The analysis of the results of scientific research in the field of wood drying technology shows the existence of fundamental knowledge in the field of heat and mass transfer, which is the main theoretical basis for modeling thermal processes during the heating period, as well as predicting the dynamics of changes in the properties of lumber. It is noted that the transition to a new type of coolant, a radical change in the type of enclosure structures of timber drying chambers led to a change in the technology of the initial heating of wood. The majority of the enterprises in woodworking industry of Belarus has passed to the use of cheaper and easy-to-use heat-carrier – hot water, which supposes the carrying out of the initial heating operation at the level of the medium saturation φ at 0,8–0,85 ($\Delta t = 2,5–3,5$). It is concluded that to date there is no unified approach to the technology of initial heating in an unsaturated medium. To improve the technical and economic efficiency of the process of heating wood it is proposed to develop a mathematical model to determine the duration of this operation, establish the nature and value of the internal stress in wood, determine the energy consumption for different heating conditions, determine the impact of technological factors on the value of the temperature and humidity differences in the wood during heating, to study the nature of the thermal properties of wood in time in non-stationary conditions, establish the patterns of change.

Keywords: initial heating, heat transfer medium, heat and mass transfer, technology, drying, wood, duration.

For citation: Rudak O. G. Current understanding of the technology of initial heating of wood in an unsaturated environment (review). *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 193–203. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-22 (In Russian).

Введение. В Республике Беларусь древесина является одним из основных возобновляемых природных ресурсов и важнейших национальных богатств. Площадь земель, покрытых лесами, составляет около 8333,2 тыс. га, или 40,1% [1, 2]. Породный состав лесного фонда страны состоит на 58,5% из хвойных пород, 49% из которых составляет древесина сосны [3].

Деревообрабатывающая отрасль является одной из крупнейших производственных отраслей Беларуси и включает в себя полный цикл переработки: от заготовки делового сырья до процесса отделки готового изделия. Известно, что в структуре объема промышленного производства доля обрабатывающей промышленности нашей страны составляет 89,4% [4]. Также стоит отметить, что удельный вес по виду экономической деятельности «Производство изделий из дерева и бумаги; полиграфическая деятельность и тиражирование записанных носителей информации» в общем объеме промышленного производства Республики Беларусь составляет 6,4% (6-я позиция рейтинга), где в том числе на производство изделий из древесины приходится 43,4%, на пиломатериалы – 26,9% (4278 тыс. м³ пиломатериалов в год) [4].

Немаловажен и тот факт, что в настоящее время серьезно поднимается вопрос не только рационального использования древесных ресурсов, но и сокращения экологических рисков и деградации окружающей среды [5], обсуждаются перспективы перехода к «зеленой» экономике [6], что в совокупности является одним из основополагающих направлений устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь [7].

Деревообрабатывающая промышленность является одной из традиционных отраслей экономики Беларуси. Пути повышения эффективности использования древесины неразрывно связаны с многочисленными исследованиями, необходимыми для разработки и внедрения прогрессивных инновационных технологий, позволяющих сокращать энергетические затраты, снижать образование значительного количества отходов и повышать качественные характеристики готовой продукции, что в конечном итоге позволяет получать конкурентоспособную продукцию с высокой добавленной стоимостью.

Глобальная тенденция цифровизации общества и перехода на цифровую экономику диктует основные направления трансформации индустриальных процессов. Исследования в области деревообработки способствуют накоплению огромного массива данных (Big Data), необходи-

мых для дальнейшего создания наукоемких технологий [8].

Производство конкурентоспособной продукции из древесины невозможно без наличия качественного древесного сырья. Поэтому одним из обязательных и самых важных технологических этапов подготовки сырья к производству изделий является сушка древесины.

Огромный вклад в развитие теории и практики сушки древесины внесли ученые А. В. Лыков, Г. С. Шубин, П. С. Серговский, И. В. Кречетов, А. И. Расев, Н. С. Селюгин, Н. Н. Чулицкий, А. Г. Гороховский, Б. С. Чудинов, В. А. Сычевский, П. В. Болдырев, Б. Н. Уголев, Р. Г. Сафин и др.

Анализ результатов научных исследований в области технологии сушки древесины свидетельствует о наличии фундаментальных знаний в области тепломассопереноса, что является основной теоретической базой для моделирования тепловых процессов в период прогрева, а также прогнозирования динамики изменения свойств пиломатериалов.

Переход на новый вид теплоносителя, кардинальное изменение вида ограждающих конструкций лесосушильных камер обуславливают необходимость проведения дополнительных исследований существующих механизмов прогрева и сушки, а также разработки новых математических моделей прогнозирования продолжительности процесса сушки, что в дальнейшем позволит получить высококачественную продукцию при минимальных затратах энергии.

Кроме того, полученные в результате исследований закономерности тепломассопереноса, установленные зависимости показателей качества древесины от технологических факторов, разработанные математические модели могут послужить базой для создания новейшей цифровой технологии прогнозирования, управления и контроля технологического процесса сушки древесины.

Основная часть. Древесина как объект исследования представляет собой капиллярно-пористый коллоидный материал [9], стенки капилляров которого обладают свойствами ограниченно набухающих гелей. Это означает, что содержание в древесине связанной влаги, находящейся в клеточных стенках, не может превышать некоего максимума, называемого пределом насыщения клеточных стенок (приблизительно равен $W_{\text{пн}} = 30\%$) [10, 11]. Также древесина является гигроскопичным материалом, способным поглощать (либо отдавать) влагу из окружающей среды, поэтому влажность древесины изменяется

при изменении влажности и температуры окружающего воздуха [12]. Характерной особенностью структуры древесины является специфическая ориентация в ней различных тканей – анизотропия [13, 14].

В технологическом процессе деревообработки сушка древесины (или «обезвоживание») – один из важнейших и наиболее энергозатратных этапов [15–17]. Кроме того, проведение операции сушки предохраняет древесину от поражения дереворазрушающими и дереворастворяющими грибами в процессе ее хранения и транспортировки, предупреждает размеро- и формоизменяемость древесины в процессе хранения и эксплуатации изделий из нее, улучшает качество отделки и склеивания древесины [18].

Интересен тот факт, что развитие дереворазрушающих грибов происходит при температуре окружающего воздуха от 5 до 35°C [19, 20]. Дальнейшее повышение температуры от 35 до 55°C ведет к гибели грибницы. Следовательно, минимальной температурой сушильного агента при проведении технологических операций камерной сушки древесины является 35–40°C.

Сушка представляет собой сложный энергоемкий процесс, связанный с протеканием физических явлений, относящихся к классу явлений переноса:

- 1) поглощение тепла поверхностью материала – теплообмен;
- 2) перемещение тепла по материалу – теплопроводность;
- 3) испарение влаги с поверхности материала – влагообмен;
- 4) перемещение влаги по материалу – влаготеплопроводность [21, 22].

Процесс сушки древесины нагретым воздухом состоит из трех последовательных этапов: нагревания влажных пиломатериалов (2–6% от общей продолжительности сушки), собственно сушки (95–85%) и охлаждения высушенной древесины (2–6%).

Первым технологическим этапом сушки древесины является *начальный прогрев* [23]. Основное назначение операции начального прогрева – это повышение температуры пиломатериалов, предназначенных для сушки, до уровня температуры сушильного агента, а также подготовка влаготеплопроводящей системы древесины к испарению влаги [24].

Во время прогрева повышается влаготеплопроводность древесины (за счет снижения вязкости влаги в капиллярах), в результате чего влага интенсивно начинает перемещаться из центральной зоны к поверхности материала. В конце данной операции древесина равномерно прогревается по толщине и ее влаготеплопроводящая система подготовлена к началу сушки [25, 26].

Следует отметить, что под действием перепада температур на поверхности и внутри древесины возникает интенсивный поток влаги от более горячих зон к более холодным даже в тех случаях, когда холодная зона оказывается более влажной [27, 28]. Поэтому сушка не должна начинаться до полного прогрева (сквозного по толщине досок). Это значит, что температура в центре сечения досок до начала сушки должна быть не ниже температуры по мокрому термометру психрометра для 1-й ступени сушки.

Во время прогрева пиломатериалов стремятся избежать как испарения влаги из материала, так и его увлажнения. Для этого создают в камере такие условия, при которых влага во время прогрева не могла бы испаряться из древесины, так как преждевременное испарение влаги с поверхностных слоев может вызвать появление напряжений. Избежать испарения влаги из материала можно, если давление водяного пара в воздухе p_n будет равно давлению пара на поверхности древесины, т. е. $p_n = p_d$. Направление процесса (сорбция или десорбция) и его скорость можно установить по температуре и равновесной влажности древесины на поверхности материала. Таким образом, при $p_d > p_n$ влага будет испаряться из материала, а при $p_d < p_n$ влага будет переходить на поверхность древесины, увлажняя ее [25].

На сегодняшний день существует два основных способа проведения начального прогрева в камерах с увлажнителем в виде:

- 1) водяного пара;
- 2) холодной диспергированной воды.

В первом случае в сушильной камере создается высокая степень насыщенности среды φ , близкая к 1 ($\Delta t = 0,5–1,5^\circ\text{C}$).

Во втором случае степень насыщенности среды φ поддерживается на уровне 0,80–0,85 ($\Delta t = 2,5–3,5^\circ\text{C}$) [29, 30].

Необходимо отметить, что для проведения операции начального прогрева в насыщенной среде (случай 1) применяются лесосушильные камеры отечественного производства таких марок, как СПЛК, СПВ, ВК и других, разработанные в 70-х гг. XX в. В качестве теплоносителя и увлажнителя в таких сушильных установках выступает водяной пар [31, 32]. В сушильное пространство камеры для интенсивного начального прогрева древесины пар подают через увлажнительные трубы при включенных калориферах, работающих в вентиляторах и закрытых приточно-вытяжных каналах. В соответствии с общепринятой практикой и Руководящими техническими материалами (далее – РТМ) по технологии камерной сушки древесины [33] для безопасного начального прогрева перед сушкой в камере создается высокая степень насыщенности среды при

повышенной по сравнению с первой ступенью режима сушки температуре. Для создания высокой степени насыщенности психрометрическую разность Δt поддерживают на уровне $0,5\text{--}1,5^\circ\text{C}$ ($\varphi = 0,93\text{--}0,97$) [34].

В современной литературе [35] степень насыщенности среды при прогреве в камерах с теплоносителем и увлажнителем в виде водяного пара предлагают устанавливать иначе: для древесины с начальной влажностью более 25% – в пределах $0,98\text{--}1,0$, а для древесины с влажностью менее 25% – $0,90\text{--}0,92$.

Температуру среды $T_{\text{пр}}$ при прогреве пиломатериалов из древесины мягких хвойных пород (сосны, ели, кедра, пихты) поддерживают в зависимости от толщины и категории режима сушки в соответствии с данными, отраженными в специализированной таблице [36]. Древесину выдерживают при указанных параметрах до тех пор, пока разность между температурой среды и температурой в центре доски не достигнет 3°C . После этого температура среды снижается до уровня первой ступени сушки без отключения циркуляционной системы сушильной камеры. При соблюдении такого режима прогрева не происходит снижения влажности поверхностных слоев древесины и, следовательно, накопления в материале напряжений. Это делает операцию начального прогрева безопасной, но удлиняет процесс, так как собственно сушки на данной стадии не происходит [37].

Нагревать материал можно с любой скоростью; температурные напряжения в древесине в отличие от влажностных ничтожны [38]. Ориентировочно продолжительность прогрева мягких хвойных пород составляет $1\text{--}1,5$ ч летом и $1,5\text{--}2$ ч зимой на каждый сантиметр толщины пиломатериала, считая от момента достижения в камере заданной температуры для прогрева древесины. Для пиломатериалов мягких лиственных пород эта продолжительность увеличивается на 25%, для твердых пород – на 50% [39]. Также в РТМ предлагается аналитический способ расчета продолжительности начального прогрева по специализированной формуле.

Существенный вклад в исследование процессов нагревания древесины внес Г. С. Шубин. Метод расчета продолжительности прогрева, разработанный Г. С. Шубиным, позволил учесть явление замедления прогрева штабеля путем введения коэффициента замедления $C_{\text{пр}}$, представляющего собой отношение длительности прогрева в наиболее отстающей зоне штабеля к длительности прогрева единичного сортимента на входе агента сушки в штабель [40, 41]. Данный метод опирается на основные уравнения теории теплопроводности и учитывает начальную температуру сортимента. Результаты мно-

гочисленных расчетов объединены в специальную номограмму [42]. Также были сделаны выводы о том, что коэффициент замедления прогрева зависит от характера циркуляции и длительности его цикла Δt , степени насыщенности среды φ и темпа подъема температуры среды при помещении в нее сушильного штабеля. Коэффициент $C_{\text{пр}}$ не зависит от влажности древесины W и ее начальной температуры ($t_0 > 0^\circ\text{C}$ и $t_0 < 0^\circ\text{C}$).

Кроме того, Г. С. Шубиным и А. В. Чемодановым был разработан следующий способ предварительной тепловой обработки древесины перед сушкой. Штабель пиломатериалов продувался воздухом, увлажненным водяным паром; психрометрическая разность поддерживалась на уровне $\Delta t = 0,5\text{--}1,5^\circ\text{C}$, а температура прогрева $t_{\text{пр}}$ рассчитывалась по формуле [43]

$$t_{\text{пр}} = a + b \cdot S,$$

где a и b – коэффициенты, зависящие от категории режима последующей сушки; S – толщина пиломатериала, см.

Теми же авторами был предложен еще один способ начальной обработки пиломатериалов перед сушкой [44]. Штабель пиломатериалов продувался воздухом, увлажненным водяным паром; температура прогрева устанавливалась в соответствии с технологическим режимом. С целью интенсификации процесса обработки осуществляли одностороннюю продувку штабеля агентом обработки с разной скоростью в зависимости от температуры обработки и толщины пиломатериалов. Также предлагалось проводить продувку с изменением направления при скоростях, превышающих верхний предел указанных интервалов для пиломатериалов соответствующей толщины [45].

Стоит отметить, что в своих работах Г. С. Шубин [27] четко определил технологические факторы, оказывающие влияние на древесину в процессе прогрева: порода, толщина пиломатериала S , см, и его начальная температура t_0 , $^\circ\text{C}$, температура прогрева $T_{\text{пр}}$, $^\circ\text{C}$, степень насыщенности среды φ , скорость циркуляции агента обработки ω , м/с; уровень достигаемой в центре сортимента температуры $t_{\text{ц}}$, $^\circ\text{C}$.

Вышеприведенный анализ источников литературы [21–27] показал, что изучение процесса начального прогрева древесины основывается на явлениях тепломассопереноса для условий нагревания в насыщенной среде ($\varphi \approx 1$), что соответствует прогреву в камерах с паром в качестве увлажнителя.

Однако особенностью таких камер является малая вместимость (в среднем от 16 до 70 м^3 условного пиломатериала), повышенная энергоемкость (установленная мощность электродви-

гателей составляет от 18 до 45 кВт) и неэффективная аэродинамика [45–48].

Обращает на себя внимание и тот факт, что в связи с существенными энергетическими затратами на производство перегретого водяного пара, сложностью регулировки температуры теплоносителя, технической сложностью оборудования для производства и эксплуатации водяного пара применение такого неэкономичного теплоносителя на сегодняшний день является нецелесообразным [49].

Также необходимо обратить внимание на то, что исследование механизмов проведения начального прогрева и особенностей явлений тепло-массопереноса в ненасыщенной среде ($\varphi < 1$) малочисленны [50, 51], носят частный характер, недостаточно изучены и требуют дополнений.

На сегодняшний день большинство предприятий деревообрабатывающей отрасли перешло на использование более дешевого и простого в эксплуатации теплоносителя – горячей воды. Выбор обусловлен преимуществами воды как теплоносителя: высокая плотность и удельная теплоемкость, сравнительно низкая вязкость, высокие значения коэффициента теплоотдачи, низкая химическая активность, нетоксичность, дешевизна и доступность, возможность регулирования уровня температуры.

Широкое распространение получили конвективные сушильные камеры как зарубежных, так и отечественных производителей, в которых в качестве теплоносителя используют непосредственно горячую воду. Технологические режимы, используемые в программном обеспечении систем автоматизации данных камер, позволяют производить сушку пиломатериалов при условии минимизации энергозатрат и вероятности возникновения брака в процессе сушки.

Очевидно, что переход на воду предсказуемо повлек за собой изменение традиционной технологии начального прогрева. Так, при увлажнении сушильного агента в период прогрева вода подается в пространство камеры в диспергированном виде через систему форсунок, установленных на увлажнительной трубе. Таким образом, само увлажнение получается не прямым, как в случае пара, а опосредованным, происходящим в процессе перехода диспергированной влаги в парообразное состояние. Данный метод менее эффективен и не позволяет быстро достигать высоких значений насыщенности сушильного агента. Поэтому фактически прогрев пиломатериалов в камерах, использующих в качестве теплоносителя воду, происходит в ненасыщенной среде. Предварительные исследования показали, что значе-

ние насыщенности воздуха φ при этом колеблется в диапазоне 70–90%.

Необходимо подчеркнуть, что применение в качестве теплоносителя горячей воды с температурой 95°C обеспечивает максимальную температуру обрабатываемого агента внутри камеры не более 80–83°C. Данный факт свидетельствует о том, что максимальная температура как сушки, так и прогрева не может превышать 80°C. Также при использовании системы водяного нагрева «теплоноситель – вода с температурой 74°C» процесс сушки является наиболее экономичным [52].

Кроме вышесказанного следует отметить, что количественные значения параметров режима прогрева каждый производитель камер устанавливает согласно своим требованиям, основанным на собственных экспериментальных данных. Соответственно, отсутствует единый подход к технологии прогрева. Также немаловажен и тот факт, что технологические режимы для данных камер разрабатывались на территории стран, климат в которых в той или иной степени отличается от климатических условий Республики Беларусь. При разработке режимов сушки и прогрева не были учтены некоторые факторы, характерные для белорусских деревообрабатывающих предприятий. Например, не учитывалось, что на участки сушки в зимний период поступает замороженная древесина с $t_0 < 0^\circ\text{C}$; базисная плотность древесины сосны для нашего климата $\rho_{\text{баз}} = 400 \text{ кг/м}^3$, в то время как у других производителей она принимается 320 и 480 кг/м^3 [53–55]. Также средняя начальная влажность $W_{\text{нач}}$ и температура t_0 прогреваемых пиломатериалов существенно отличаются в южных и северных широтах.

Соответственно, количественные значения параметров режимов и продолжительности прогрева не всегда могут быть эффективно применены для наших условий, а в некоторых случаях приводят к возникновению значительного процента брака, а также повышению стоимости сушки.

Также вызывает интерес то обстоятельство, что в современных сушильных камерах взаимосвязь между температурой, степенью насыщенности обрабатываемого агента и начальной влажностью пиломатериала отображают как значение равновесной влажности, которая на экране пульта управления обозначается английскими буквами EMC.

Примеры режимов начального прогрева древесины сосны для сушильных камер марок SECAL (Италия), CAT HILD (Франция), LAUBER (Германия), INCOPLAN (Италия) отражены в таблице ниже.

Режимы начального прогрева

Толщина S , мм	Равновесная влажность EMC, %	Параметры режима прогрева			Продолжительность прогрева τ , ч
		φ	Δt	T , °C	
Фирма SEKAL					
30–60	14	0,77	4,0	40	3–6
> 60	16	0,82	3,0	38	8–10
Фирма CATHILD					
< 35	14	0,81	4,0	65	3
35–60	14,5	0,83	3,5	65	6
Фирма LAUBER					
36–75	15,5	0,83	3,5	35	6
> 75	15	0,81	3,5	35	8
Фирма INCOPLAN					
30–60	18	0,86	2,5	45	6–8
> 60	19	0,87	2,0	45	10

Анализируя данные таблицы, можно заметить, как отличается интервал параметров режима прогрева: одни производители проводят начальный прогрев в условиях, близких к насыщению, а другие – при параметрах среды, соответствующих первой ступени сушки. Также очевиден и тот факт, что продолжительность прогрева варьируется в пределах 3–8 ч для пиломатериалов толщиной до 60 мм и 6–10 ч для пиломатериалов толщиной более 60 мм. При этом производитель сушильных камер CATHILD в практическом руководстве предлагает определять продолжительность операции по специальной формуле.

Кроме того, современные технологии сушки рекомендуют проводить начальный прогрев пиломатериалов при высокой влажности агента обработки в сушильной камере, разница показаний психрометра должна быть не более 5°C, а продолжительность прогрева – не менее 6 ч в зависимости от породы и толщины пиломатериала [56].

Следует обратить внимание на нетрадиционные способы начальной обработки пиломатериалов перед сушкой. Элдер Денни (США) [55] предлагает нагревать древесину в камере с температурой более 68,8°C и далее охлаждать в охлаждающей жидкости для удаления не менее 5% влаги из древесины. При таком способе подготовки древесины достигается ее ускоренная сушка по сравнению с общепринятой.

Дожковым С. В. [57] предлагается способ тепловой обработки высоковлажных пиломатериалов перед сушкой путем погружения их в горячую воду и прогрева в ней в течение 10–30 мин. Вода в ванне находится в кипящем состоянии.

Однако вышеописанные нетрадиционные методы начального прогрева не нашли широкого

применения. Очевиден и тот факт, что на сегодняшний день отсутствует единый подход к технологии проведения прогрева древесины в ненасыщенной среде.

Выводы. Проведенный аналитический обзор состояния вопроса начального прогрева древесины подтвердил актуальность необходимости дальнейших исследований в данном направлении и позволил обосновать основные аспекты совершенствования процесса нагревания пиломатериалов. Современные представления о технологии камерной сушки отчетливо демонстрируют запрос на изучение механизмов прогрева древесины в ненасыщенной среде. Требуется установить закономерности изменения температуры и влажности пиломатериала во времени в период прогрева в ненасыщенной среде, определить влияние технологических факторов на величину перепадов температуры и влажности древесины при прогреве, изучить характер изменения тепловых свойств древесины во времени в нестационарных условиях. Также необходимо теоретически обосновать модель процесса теплопереноса в древесине в период начального прогрева в ненасыщенной среде.

С целью повышения технико-экономической эффективности процесса сушки древесины следует разработать математическую модель определения продолжительности прогрева; установить характер и величину внутренних напряжений в древесине (один из показателей качества сушки древесины) в период прогрева в ненасыщенной среде и оценить безопасность данного процесса с точки зрения обеспечения целостности прогреваемой древесины; определить расход энергии для различных условий прогрева.

Список литературы

1. Статистический обзор ко дню работников леса от 15.09.2022. Статистический буклет // Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. URL: https://www.belstat.gov.by/upload-belstat/upload-belstat-pdf/oficial_statistika/statobzor_forest-2022.pdf (дата обращения: 02.03.2023).

2. Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь // Лесной фонд. URL: <https://mlh.by/our-main-activities/forestry/forests/> (дата обращения: 01.03.2023).
3. Павел Абрамович. День лесного хозяйства: пять фактов о лесах Беларуси и работниках Минлесхоза // Точка. URL: https://tochka.by/articles/life/den_lesnogo_khozyaystva_pyat_faktov_o_lesakh_belarusi_i_rabotnikakh_minleskhoza/ (дата обращения: 01.03.2023).
4. Промышленность Республики Беларусь (2022). Статистический буклет // Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. URL: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/254/6n0355kev4y4cnpqrt0p2886gl0f1j4b.pdf> (дата обращения: 01.03.2023).
5. Неверов А. В., Водопьянова Т. П. Экономика природопользования. Минск: БГТУ, 2019. 116 с.
6. Дорожная карта по реализации ЦУР в Республике Беларусь // Цели устойчивого развития Беларуси. URL: https://sdgs.by/kcfinder/upload/files/FINAL_Дорожная_карта_ЦУР_RU_25_06.pdf (дата обращения: 03.03.2023).
7. Национальная платформа представления отчетности по показателям Целей устойчивого развития (ЦУР) // Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. URL: <http://sdgplatform.belstat.gov.by/sites/belstatfront/home.html> (дата обращения: 04.03.2023).
8. Стратегия «Наука и технологии: 2018–2040» // Нац. акад. наук Беларуси. URL: https://gknt.gov.by/upload/Deyatelnost/Meropriyatia/strategy_2018-2040.pdf (дата обращения: 03.03.2023).
9. Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория тепло- и массопереноса. М.: Госэнергоиздат, 1963. 535 с.
10. Снопков В. Б., Федосенко И. Г. Гидротермическая обработка и защита древесины. Лабораторный практикум. Минск: БГТУ, 2015. 114 с.
11. Чудинов Б. С. Вода в клеточной стенке древесины. Красноярск: СО АН СССР, 1978. 44 с.
12. Расев А. И. Сушка древесины. СПб.: Лань, 2010. 416 с.
13. Чудинов Б. С. Вода в древесине. Новосибирск: Наука, 1984. 267 с.
14. Перельгин Л. М. Строение древесины. М.: Гослесбумиздат, 1954. 200 с.
15. Гороховский А. Г. Технология сушки пиломатериалов на основе моделирования и оптимизации процессов тепломассопереноса в древесине: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.05. СПб., 2008. 263 с.
16. Соломонов В. Д. Проблемы совершенствования техники и технологии для сушки древесины и эффективные пути их решения // Деревообрабатывающая промышленность. 2003. № 5. С. 19–25.
17. Данилов О. Л. Научно-технические основы интенсификации сушки и энергосбережения в сушильных установках: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.04. М., 1996. 39 с.
18. Серговский П. С. Режимы и проведение камерной сушки пиломатериалов. М.: Лесная промышленность, 1976. 136 с.
19. Ермолина Т. В. Защитная обработка древесины. Красноярск: СибГТУ, 2015. 214 с.
20. Семенова И. Г. Фитопатология. Дереворазрушающие грибы, гнили и патологические окраски древесины. М.: МГУЛ, 2001. 58 с.
21. Сычевский В. А. Процессы тепломассопереноса, деформации и подвижные границы в дисперсных системах. Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2009. 227 с.
22. Серговский П. С., Расев А. И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. М.: Лесная промышленность, 1987. 360 с.
23. Расев А. И. Тепловая обработка и сушка древесины. М.: МГУЛ, 2009. 360 с.
24. Чудинов Б. С. Теория тепловой обработки древесины. М.: Наука, 1968. 256 с.
25. Кречетов И. В. Сушка древесины. М.: Лесная промышленность, 1980. 432 с.
26. Кречетов И. В. Сушка и защита древесины. М.: Лесная промышленность, 1987. 324 с.
27. Шубин Г. С. Физические основы и расчет процессов сушки древесины. М.: Лесная промышленность, 1973. 248 с.
28. Болдырев П. В. Сушка древесины. Практическое руководство. СПб.: Профикс, 2002. 158 с.
29. Рудак О. Г., Короб А. Ю. Исследование характера изменения влажности поверхностных и внутренних слоев древесины сосны при прогреве в ненасыщенной среде // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 1 (240). С. 162–169.
30. Рудак О. Г. Исследование параметров технологии начального прогрева древесины в ненасыщенной среде // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (246). С. 268–276.
31. Лебедев П. Д. Расчет и проектирование сушильных установок. М.: Госэнергоиздат, 1962. 320 с.
32. Соколов П. В. Проектирование сушильных и нагревательных установок для древесины. М.: Лесная промышленность, 1965. 331 с.
33. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины. Архангельск: ЦНИИМОД, 1985. 93 с.
34. Сушка древесины. Общие положения тепловой сушки древесины. Тверь: Спецмонтаж, 2003. 47 с.

35. Фридман И. Н. Деревообработка. Практическое руководство. СПб.: Профикс, 2003. 543 с.
36. Богданов Е. С. Расчет, проектирование и реконструкция лесосушильных камер. М.: Экология, 1993. 351 с.
37. Вилейшикова Н. В., Донченко Л. Ф., Снопков В. Б. Изучение режимов начального прогрева древесины в ненасыщенной среде // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2002. Вып. X. С. 177–180.
38. Ермолин В. Н. Физика древесины. Красноярск: СибГАУ, 2016. 84 с.
39. Снопков В. Б. Гидротермическая обработка и защита древесины. Примеры и задачи. Минск: БГТУ, 2005. 234 с.
40. Шубин Г. С. Сушка и тепловая обработка древесины. М.: Лесная пром-сть, 1990. 335 с.
41. Шубин Г. С. О начальной обработке пиломатериалов перед сушкой // Деревообраб. пром-сть. 1982. № 1. С. 3–7.
42. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 599 с.
43. Способ предварительной тепловой обработки пиломатериалов перед сушкой: а. с. СССР 1263982 / Г. С. Шубин, А. В. Чемоданов. Оpubл. 15.10.86.
44. Способ предварительной тепловой обработки пиломатериалов перед сушкой: а. с. СССР 1270509 / Г. С. Шубин, А. В. Чемоданов. Оpubл. 15.11.86.
45. Шубин Г. С. Проектирование установок для гидротермической обработки древесины. М.: Лесная пром-сть, 1983. 273 с.
46. Богданов Е. С. Справочник по сушке древесины. М.: Лесная пром-сть, 1990. 304 с.
47. Пейч Н. Н. Повышение производительности лесосушильных камер. М.: Гослесбуиздат, 1954. 137 с.
48. Корнеев В. И. Проблемы сушки пиломатериалов и пути их решения // Woodworking news. 2005. № 5. С. 9–14.
49. Смородин С. Н., Белоусов В. Н., Лакомкин В. Ю. Методы энергосбережения в энергетических, технологических установках и строительстве. СПб.: СПбГТУРП, 2014. 99 с.
50. Удачина О. А. Технология сушки пиломатериалов без начального увлажнения обрабатываемой среды для камер малой мощности: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05. Красноярск, 2007. 19 с.
51. Гороховский А. Г., Удачина О. А., Шишкина Е. Е. О начальном прогреве штабеля при сушке пиломатериалов без искусственного увлажнения обрабатываемой среды // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2006. № 14. С. 96–99.
52. Оти Мото Поль М. Анализ существующих способов сушки и удаления влаги из древесины // Известия С.-Петербург. лесотехн. акад. 2006. № 11. С. 98–102.
53. Acoustic properties of Scots Pine wood and genetic background / E. Konofalska [et. al.] Exploring New Discoveries and New Directions in Forests: the 3rd International Electronic Conference on Forests, 2022. DOI: 10.3390/IECF2022-13038.
54. Joanna Witkowska, Hubert Lachowicz. Analysis of variation in pure density of Scots pine wood (*Pinus sylvestris* L.) along a trunk height depending on selected factors // Prace naukowe. 2012. P. 1–6.
55. Kretschmann D. E. Mechanical properties of wood // Environments. 2010. Vol. 5. P. 34.
56. Тетерин Л. А. Как улучшить качество продукции (Часть II) // Дерево.RU. 2004. № 5. С. 50–52.
57. Способ предварительной тепловой обработки высоковлажных пиломатериалов: а. с. СССР 2069788 / С. В. Дожков. Оpubл. 31.08.76.

References

1. Statistical review for the day of working scaffolds from 09/15/2022. Statistical booklet. Available at: https://www.belstat.gov.by/upload-belstat/upload-belstat-pdf/oficial_statistika/statobzor_forest-2022.pdf (accessed 02.03.2023) (In Russian).
2. Ministry of Forestry of the Republic of Belarus. Available at: <https://mlh.by/our-main-activites/forestry/forests/> (accessed 01.03.2023) (In Russian).
3. Pavel Abramovich. Forestry Day: five facts about the forests of Belarus and employees of the Ministry of Forestry. Available at: https://tochka.by/articles/life/den_lesnogo_khozyaystva_pyat_faktov_o_lesakh_belarusi_i_rabotnikakh_minleskhoza/ (accessed 01.03.2023) (In Russian).
4. Industry of the Republic of Belarus (2022). Statistical booklet // National Statistical Committee of the Republic of Belarus. Available at: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/254/6n0355kev4y4cnpqr0p2886gl0flj4b.pdf> (accessed 01.03.2023) (In Russian).
5. Neverov A. V., Vodop'yanova T. P. *Ekonomika prirodopol'zovaniya* [Economics of nature management]. Minsk, BGTU Publ., 2019. 116 p. (In Russian).

6. Roadmap for the implementation of the SDGs in the Republic of Belarus. Available at: https://sdgs.by/kcfinder/upload/files/FINAL_Дорожная_карта_ЦУП_RU_25_06.pdf (accessed 03.03.2023) (In Russian).
7. National platform for reporting on indicators of the Sustainable Development Goals (SDGs). Available at: <http://sdgplatform.belstat.gov.by/sites/belstatfront/home.html> (accessed 04.03.2023) (In Russian).
8. Strategy “Science and Technology: 2018–2040”. Available at: https://gknt.gov.by/upload/Deyatelnost/Meropriyatia/strategy_2018-2040.pdf (accessed 03.03.2023) (In Russian).
9. Lykov A. V., Mikhaylov Yu. A. *Teoriya teplo- i massoperenosa* [Theory of heat and mass transfer]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1963. 535 p. (In Russian).
10. Snopkov V. B., Fedosenko I. G. *Gidrotermicheskaya obrabotka i zashchita drevesiny. Laboratorny praktikum* [Hydrothermal treatment and protection of wood. Laboratory workshop]. Minsk, BGTU Publ., 2015. 114 p. (In Russian).
11. Chudinov B. S. *Voda v kletochnoy stenke drevesiny* [Water in the cell wall of wood]. Krasnoyarsk, SO AN SSSR Publ., 1978. 44 p. (In Russian).
12. Rasev A. I. *Sushka drevesiny* [Wood drying]. St. Petersburg, Lan’ Publ., 2010. 416 p. (In Russian).
13. Chudinov B. S. *Voda v drevesine* [Water in wood]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984. 267 p. (In Russian).
14. Perelygin L. M. *Stroyeniye drevesiny* [Wood structure]. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1954. 200 p. (In Russian).
15. Gorokhovskiy A. G. *Tekhnologiya sushki pilomaterialov na osnove modelirovaniya i optimizatsii protsessov teplomassoperenosa v drevesine. Dissertatsiya doktora tekhnicheskikh nauk* [Lumber drying technology based on modeling and optimization of heat and mass transfer processes in wood. Dissertation DSc (Engineering)]. St. Petersburg, 2008. 263 p. (In Russian).
16. Solomonov V. D. Problems of improving equipment and technology for drying wood and effective ways to solve them. *Derevoobratyvvayushchaya promyshlennost’* [Woodworking industry], 2003, no. 5, pp. 19–25 (In Russian).
17. Danilov O. L. *Nauchno-technicheskiye osnovy intensivatsii sushki i energosberezheniya v sushil’nykh ustanovkakh. Avtoreferat dissertatsii doktora tekhnicheskikh nauk* [Scientific and technical bases of drying intensification and energy saving in drying plants. Abstract of thesis DSc (Engineering)]. Moscow, 1996. 39 p. (In Russian).
18. Sergovskiy P. S. *Rezhimy i provedeniye kamernoy sushki pilomaterialov* [Modes and carrying out chamber drying of wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost’ Publ., 1976. 136 p. (In Russian).
19. Ermolina T. V. *Zashchitnaya obrabotka drevesiny* [Protective wood treatment]. Krasnoyarsk, SibGTU Publ., 2015. 214 p. (In Russian).
20. Semenkov I. G. *Fitopatologiya. Derevorazrushayushchiye griby, gnili i patologicheskiye okraski drevesiny* [Plant pathology. Wood-destroying fungi, rot and pathological stains of wood]. Moscow, MGUL Publ., 2001. 58 p. (In Russian).
21. Sychevskiy V. A. *Protsessy teplomassoperenosa, deformatsii i podvizhnyye granitsy v dispersnykh sistemakh* [Heat and Mass Transfer Processes, Deformations, and Moving Boundaries in Dispersed Systems]. Minsk, Institut teplo- i massoobmena imeni A. V. Lykova NAN Belarusi Publ., 2009. 227 p. (In Russian).
22. Sergovskiy P. S., Rasev A. I. *Gidrotermicheskaya obrabotka i konservirovaniye drevesiny* [Hydrothermal processing and preservation of wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost’ Publ., 1987. 360 p. (In Russian).
23. Rasev A. I. *Teplovaya obrabotka i sushka drevesiny* [Heat treatment and drying of wood]. Moscow, MGUL Publ., 2009. 360 p. (In Russian).
24. Chudinov B. S. *Teoriya teplovooy obrabotki drevesiny* [Wood heat treatment theory]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 256 p. (In Russian).
25. Krechetov I. V. *Sushka drevesiny* [Drying of wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost’ Publ., 1980. 432 p. (In Russian).
26. Krechetov I. V. *Sushka i zashchita drevesiny* [Drying and protecting wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost’ Publ., 1987. 324 p. (In Russian).
27. Shubin G. S. *Fizicheskiye osnovy i raschet protsessov sushki drevesiny* [Physical basis and calculation of wood drying processes]. Moscow, Lesnaya promyshlennost’ Publ., 1973. 248 p. (In Russian).
28. Boldyrev P. V. *Sushka drevesiny. Prakticheskoye rukovodstvo* [Drying wood. Practical guide]. St. Petersburg, Profiks Publ., 2002. 158 p. (In Russian).
29. Rudak O. G., Korob A. Yu. Investigation of the nature of changes in the humidity of the surface and inner layers of pine wood during heating in an unsaturated environment. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2021, no. 1 (240), pp. 162–169 (In Russian).
30. Rudak O. G. Study of the parameters of the technology of initial heating of wood in an unsaturated medium. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 2, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2021, no. 2 (246), pp. 268–276 (In Russian).

31. Lebedev P. D. *Raschet i proyektirovaniye sushil'nykh ustanovok* [Calculation and design of drying plants]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1962. 320 p. (In Russian).
32. Sokolov P. V. *Proyektirovaniye sushil'nykh i nagrevatel'nykh ustanovok dlya drevesiny* [Design of drying and heating installations for wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1965. 331 p. (In Russian).
33. *Rukovodyashchiye tekhnicheskiye materialy po tekhnologii kamernoy sushki drevesiny* [Guiding technical materials on the technology of chamber drying of wood]. Arkhangelsk, TsNIIMOD Publ., 1985. 92 p. (In Russian).
34. *Sushka drevesiny. Obshchiye polozeniya teplovoy sushki drevesiny* [Wood drying. General provisions for thermal drying of wood]. Tver, Spetsmontazh Publ., 2003. 47 p. (In Russian).
35. Fridman I. N. *Derevoobrabotka. Prakticheskoye rukovodstvo* [Woodworking. Practical guide]. St. Petersburg, Profiks Publ., 2003. 543 p. (In Russian).
36. Bogdanov E. S. *Raschet, proyektirovaniye i rekonstruktsiya lesosushil'nykh kamer* [Calculation, design and reconstruction of drying chambers]. Moscow, Ekologiya Publ., 1993. 351 p. (In Russian).
37. Vileishikova N. V., Donchenko L. F., Snopkov V. B. Study of the modes of initial heating of wood in an unsaturated environment. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2002, issue X, pp. 177–183 (In Russian).
38. Ermolin V. N. *Fizika drevesiny* [Physics of wood]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2016. 84 p. (In Russian).
39. Snopkov V. B. *Gidrotermicheskaya obrabotka i zashchita drevesiny. Primery i zadachi* [Hydrothermal treatment and protection of wood. Examples and tasks]. Minsk, BGTU Publ., 2005. 234 p. (In Russian).
40. Shubin G. S. *Syshka i teployaya obrabotka drevesiny* [Drying and heat treatment of wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 335 p. (In Russian).
41. Shubin G. S. About the initial processing of lumber before drying. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Woodworking industry], 1982, no. 1, pp. 3–7 (In Russian).
42. Lykov A. V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conduction]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 599 p. (In Russian).
43. Shubin G. S., Chemodanov A. V. The method of pre-heat treatment of lumber before drying. Certificate of authorship USSR 1263982, 1986 (In Russian).
44. Shubin G. S., Chemodanov A. V. The method of pre-heat treatment of lumber before drying. Certificate of authorship USSR 1270509, 1986 (In Russian).
45. Shubin G. S. *Proyektirovaniye ustanovok dlya gidrotermicheskoy obrabotki drevesiny* [Design of installations for hydrothermal wood treatment]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 273 p. (In Russian).
46. Bogdanov E. S. *Spravochnik po sushke drevesiny* [Wood Drying Handbook]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 304 p. (In Russian).
47. Peych N. N. *Povysheniye proizvoditel'nosti lesosushil'nykh kamer* [Increasing the productivity of drying chambers]. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1954. 137 p. (In Russian).
48. Korneev V. I. Problems of drying lumber and ways to solve them. *Woodworking news*, 2005, no. 5, pp. 9–14 (In Russian).
49. Smorodin S. N., Belousov V. N., Lakomkin V. Yu. *Metody energosberezheniya v energeticheskikh, tekhnologicheskikh ustanovkakh i stroitel'stve* [Energy Saving Methods in Energy, Technological Installations and Construction]. St. Petersburg, SPbGTURP Publ., 2014. 99 p. (In Russian).
50. Udachina O. A. *Tekhnologiya sushki pilomaterialov bez nachal'nogo vvlazhneniya obrabatyvayushchey sredy dlya kamer maloy moshchnosti. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Lumber drying technology without initial moistening of the processing medium for low-power chambers. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Krasnoyarsk, 2007. 19 p. (In Russian).
51. Gorokhovskiy A. G., Udachina O. A., Shishkina E. E. On the initial heating of the stack during drying of lumber without artificial moistening of the processing medium. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2006, no. 3, pp. 96–99 (In Russian).
52. Oty Moto Pol' M. Analysis of existing methods for drying and removing moisture from wood. *Izvestiya St.-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [News St. Petersburg forestry academy], 2006, no. 11, pp. 98–102 (In Russian).
53. Eliza Konofalska, Paweł Kozakiewicz, Włodzimierz Buraczyk, Hubert Lachowicz. Acoustic properties of Scots Pine wood and genetic background. *Exploring New Discoveries and New Directions in Forests: The 3rd International Electronic Conference on Forests*, 2022. DOI: 10.3390/IECF2022-13038.
54. Joanna Witkowska, Hubert Lachowicz. Analysis of variation in pure density of Scots pine wood (*Pinus sylvestris* L.) along a trunk height depending on selected factors. *PRACE NAUKOWO*, 2012, no. 1, pp. 1–6.

55. Kretschmann D. E. Mechanical properties of wood. *Environments*, 2010, no. 5. p. 34.
56. Teterin L. A. How to improve product quality (Part II). *Derevo.RU* [Wood.RU], 2004, no. 5, pp. 50–52 (In Russian).
57. Dozhkov S. V. Method of preliminary heat treatment of high-moisture lumber. Certificate of authorship USSR 2069788, 1976 (In Russian).

Информация об авторе

Рудак Оксана Геннадьевна – магистр 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: oksrudak@mail.ru

Information about the author

Rudak Oksana Gennadievna – Master of Engineering, Senior 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

Поступила 20.03.2023

УДК 674.032.1

С. А. Дупанов, О. К. Леонович

Белорусский государственный технологический университет

**ВОЗРАСТНАЯ И ВИДОВАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ
НАТУРАЛЬНОГО МОРЕНОГО ДУБА**

На данный момент в мире известны лишь частичные максимально обобщенные сведения о мореном дубе, которые невозможно использовать для создания информационной базы о свойствах, основных видовых и возрастных отличиях мореного дуба.

Если провести параллель с древесиной обычного (не мореного) дуба, то можно сделать следующий вывод. Разновидность дуба насчитывает около 600 видов. В странах СНГ распространено около 20 видов дуба. Каждый из известных видов имеет различные структурные изменения в процессе морения, что влечет за собой изменение качественно-технических характеристик материала. Этот факт осложняется возрастной дифференциацией древесины мореного дуба. На одной территориальной местности, где разведаны залежи мореного дуба, могут находиться стволы, части стволов возрастом от 300 до 8110 лет (максимальный возраст мореного дуба, найденный на территории Беларуси предприятием ГОДО «Транс-Центр», специализирующимся на добыче и переработке натурального мореного дуба). Возраст мореного дуба напрямую влияет на его будущие качественные характеристики. Также на одной разведанной местности залежи древесины мореного дуба разных возрастных групп могут иметь видовые различия, так как за промежутки времени в несколько тысяч лет дубовые леса видоизменялись в зависимости от климатических условий, изменения минерального состава грунтов, глубины залегания и т. д. Для полного понимания древесины мореного дуба и процесса морения необходимо комплексно подходить к его изучению, что и явилось целью данной работы.

Ключевые слова: мореный дуб, реологические, видовые, возрастные свойства.

Для цитирования: Дупанов С. А., Леонович О. К. Возрастная и видовая дифференциация натурального мореного дуба // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 204–209. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-23.

S. A. Dupanov, O. K. Leonovich

Belarusian State Technological University

AGE AND SPECIES DIFFERENTIATION OF NATURAL BOG OAK

At the moment, only partial maximally generalized information about bog oak is known in the world, which cannot be used to create an information base on the properties, main species and age differences of bog oak.

If we draw a parallel with the wood of an ordinary (not bog) oak, then we can draw the following conclusion. The variety of oak has about 600 species. About twenty species of oak are common in the CIS countries. Each of the known types has various structural changes in the process of staining, which entails a change in the qualitative and technical characteristics of the material. This fact is complicated by the age differentiation of bog oak wood. In one territorial area where deposits of bog oak have been explored, there may be trunks, parts of trunks aged from 300 to 8,110 years (the maximum age of bog oak found in Belarus by the GODO “Trans-Center” enterprise, specializing in the extraction and processing of natural bog oak). The age of bog oak directly affects its future quality characteristics. Also, in one explored area, deposits of bog oak wood of different age groups may have species differences, since over a period of several thousand years, oak forests have changed depending on climatic conditions, changes in the mineral composition of soils, depth of occurrence, etc. For a complete understanding of bog oak wood and the staining process, it is necessary to take a comprehensive approach to its study, which was the purpose of this work.

Keywords: bog oak, rheological, species, age properties.

For citation: Dupanov S. A., Leonovich O. K. Age and species differentiation of natural bog oak. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 204–209. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-23 (In Russian).

Введение. Древесина мореного дуба имеет неповторимые эстетические качества. И не имеет аналогов во всем мире. Запас мореного дуба на

территории Республики Беларусь оценивается в 20 000 м³ придонного залегания. Данная древесина является национальным достоянием нашей страны.

Мореный дуб также является невосполнимым природным ресурсом, а его ограниченный запас требует в ближайшее время комплексно подойти к вопросу стандартизации процесса сушки, хранения и качественного использования.

О высоких потребительских качествах древесины мореного дуба известно с незапамятных времен. Продукция из древесины мореного дуба представляет собой шедевры искусства и неоспоримо вносит культурный вклад в развитие мебельной и архитектурной отраслей. Изделия из мореного дуба передаются по наследству, так как их качественные характеристики не меняются с годами.

В Республике Беларусь имеется единственное на всем постсоветском пространстве предприятие, которое собирает информационную базу о мореном дубе и предоставляет теоретические сведения, а также лабораторные образцы для анализа, спецификации и стандартизации.

Актуальность исследования возрастной и видовой дифференциации натурального мореного дуба связана с необходимостью правильной и правомерной оценки этого ценнейшего природного сырья и разработки котировочных параметров для создания нормативно правового акта, регулирующего определение качественных характеристик мореного дуба. Данное исследование соответствует стратегическому направлению развития деревообрабатывающей отрасли по рациональному использованию древесного сырья в производстве мебели и эксклюзивных изделий из него.

Исследования по определению физико-механических параметров отдельно взятых образцов мореного дуба, приведенные в работах [1–3], не дают комплексной оценки материалу из мореного дуба как отдельной породе древесины в полном объеме. Некоторые исследователи приводят технические характеристики древесины дуба различных видов, произрастающих на европейской территории [4–8]. Для контроля определения возраста в настоящее время используется метод радиоуглеродного анализа, который является нецелесообразным ввиду его дороговизны и сроков выполнения. Этот метод не позволяет делать полномасштабную оценку всего добываемого сырья [9, 10]. Наиболее близко подошли к исследованию качественных характеристик мореного дуба авторы, предложившие определять их по изменениям химического состава, зависящим от времени и места залегания [11–15].

Однако в рассматриваемых работах не учтены цвет, возраст, данные о залегании и сопутствующие свойства материала мореного дуба в зависимости от места и срока залегания.

Целью настоящего исследования является разработка комплексного метода определения характеристик мореного дуба на основе возрастных и видовых отличий.

Для решения данного вопроса поставлены следующие задачи:

- присвоить значения мореному дубу в соответствии с цветом;
- произвести анализ среднего аналитического значения концентрации FeO в местах залегания;
- определить зависимости между содержанием Fe(O), возрастными группами материала и его цветом;
- предложить методологию определения качественных характеристик мореного дуба в зависимости от его видовых и возрастных показателей.

Основная часть. Мореный дуб используется в изделиях, несущих культурное значение. Поэтому качественная спецификация и стандартизация улучшат общее понимание об этом материале.

Стандартизацию требуется начать с ввода параметров исследуемых образцов, поиска ключевых параметров исследования (цвета, возраста структуры (вида)) и установления зависимости.

1. Цвет мореного дуба. Цветовая гамма мореного дуба очень широкая. Но для определения зависимости и удобства из испытуемых образцов выделены 3 основных цвета: коричнево-серый, черный и 3 дополнительных: коричнево-серый, коричнево-черный, серо-черный (рис. 1–6). Ни у одной древесины в мире нет такой широкой цветовой гаммы.

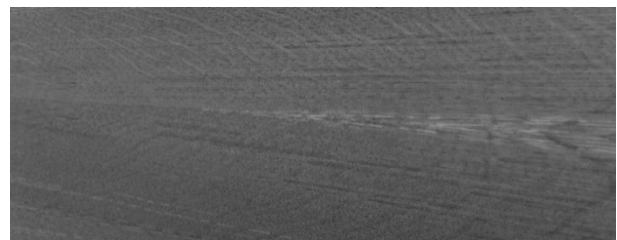


Рис. 1. Коричневый цвет

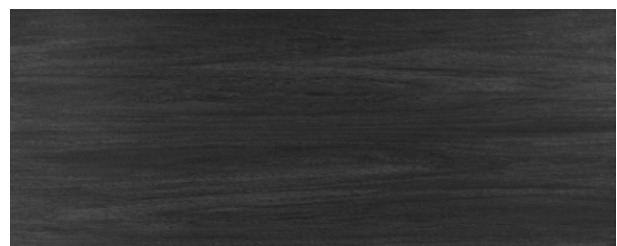


Рис. 2. Серый цвет

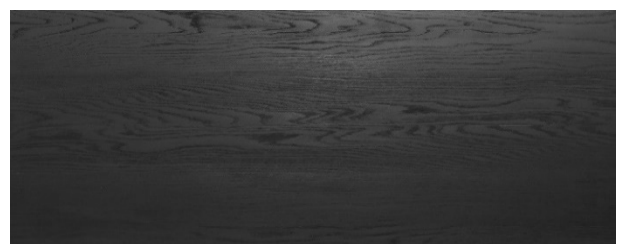


Рис. 3. Черный цвет

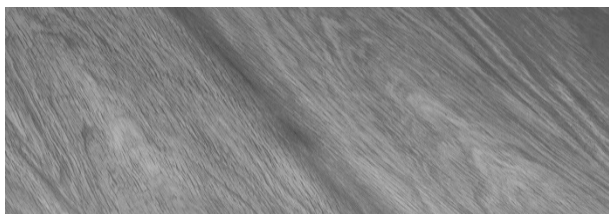


Рис. 4. Коричнево-серый цвет



Рис. 5. Коричнево-черный цвет



Рис. 6. Серо-черный цвет

Приобретенная окраска зависит от первостепенных факторов – возраста (период залегания), минерального состава (место залегания) и второстепенных факторов (глубина и вид залегания), а именно нахождения в реках, озерах, грунтах, иловых отложениях и т. д.

2. Возраст образцов в исследовании варьирует от 500 до 6000 и более лет. Возрастная градация для периода залегания до 3000 лет выбрана ввиду наибольших внешних отличий. Вопреки общему мнению, мореный дуб подвержен структурной деградации с течением времени, так как идеальные условия залегания встречаются крайне редко. К примеру, при нахождении в агрессивных средах (мелководные реки, водные объекты с агрессивной средой и т. д.) деградация структуры дуба ускоряется. А при нахождении в грунтах, глине, донных иловых отложениях, в безвоздушной водной среде древесина мореного дуба уплотняется и при аналогичном периоде залегания имеет меньше структурных изменений и лучшие качественно-технические характеристики.

Возраст мореного дуба определяется актом радиоуглеродного анализа.

Для простоты понимания связи возраста мореного дуба с его цветом можно провести следующую аналогию без включения дополнительных факторов влияния. Взяты образцы мореного дуба, похожие по цветовым параметрам, со следующих мест: донные отложения реки Днепр, проточный участок реки Сож (поверхностный слой) и торфяник на территории Гомеля (на глубине 3 м).

Минимальное и максимальное содержание оксида железа FeO в донных отложениях реки Днепр $0,1\text{--}1,9$ мг/дм³, в поверхностных водах реки Сож $0,05\text{--}0,19$ мг/дм³ и в торфяных отложениях на глубине 3 м на территории Гомеля $0,35\text{--}3,55$ мг/дм³ (табл. 1). Выберем среднее значение и оценим результат на образцах. Для исследования было отобрано 18 образцов различных цветовых групп, каждой группе присвоен балл (табл. 2). При одинаковом периоде залегания в местах с разным содержанием FeO наблюдается разная скорость процесса морения (табл. 3).

Таблица 1

Значения средних показаний содержания окиси железа в зависимости от места залегания

Место залегания	Содержание FeO , мг/дм ³	Среднее значение содержания FeO , мг/дм ³
Днепр (донные отложения)	0,1–1,9	1
Сож (поверхностные воды)	0,05–0,19	0,12
Торфяник (верхний слой на глубине до 3 м)	0,35–3,55	1,95

3. Структура (вид) определяется визуально и образцы относятся к определенному цвету по стандартным образцам и реологическим свойствам древесины натурального мореного дуба. Дальнейшие исследования реологических свойств позволят расширить классификацию по определению качественных характеристик мореного дуба.

Классификацию решено связать с наличием окиси железа в зависимости от регионов залегания. Значения средних показаний содержания окиси железа в зависимости от места залегания приведены в табл. 2.

Таблица 2

Присвоение значения мореного дуба в соответствии с цветом

Цвет мореного дуба	Присвоенное значение, баллы
Коричневый	1
Коричнево-серый	2
Коричнево-черный	3
Серый	4
Серо-черный	5
Черный	6

Поиск зависимости содержания FeO с возрастными группами материала и цветом материала определили в баллах и привели в табл. 2, 3.

Чтобы выявить стандартную зависимость цвета от возраста, примем содержание оксида железа $\text{FeO} = 1$ мг/дм³ для простоты понимания и возможного пересчета возраста древесного материала

без проведения радиоуглеродного анализа. Точность метода визуального определения цвета будет составлять ± 100 лет. Для примера возьмем опытное определение возраста мореного дуба в навигационный сезон 2022 г.

Таблица 3
Возрастная классификация в зависимости от места залегания мореного дуба

Период залегания	Оценка древесины в зависимости от места залегания, балл		
	Донные отложения (Днепр)	Поверхностные воды (Сож)	Торфяник (на глубине до 3 м)
500	1	1	2
1000	2	1	4
1500	3	2	4
2000	4	3	6
2500	5	4	6
3000	6	4	6
4000	6	5	5
5000	5	5	5
6000	5	6	5

Рассмотрим срез натурального мореного дуба (рис. 7). Черный цвет визуально занимает периферийный слой, примерно 20%, серый цвет является основным – 50%, площадь под коричнево-серым цветом составляет 30%, содержание оксида железа в месте залегания данного образца $FeO = 1 \text{ мг/дм}^3$.



Рис. 7. Срез натурального мореного дуба

Аналитический возраст на основании визуального анализа будет равен

$$X = A1 \cdot B1 + A2 \cdot B2 + A3 \cdot B3,$$

где X – аналитический возраст мореного дуба; $A1, A2, A3$ – визуальное процентное заполнение цветом среза мореного дуба; $B1, B2, B3$ – принятый возраст согласно цвету из табл. 3.

$$X = 30 \cdot 1000 + 50 \cdot 2000 + 20 \cdot 3500 = 2000 \text{ лет.}$$

Согласно акту и радиоуглеродному анализу, данный промаркированный экземпляр древесины мореного дуба имеет возраст 2050 ± 100 лет. Это доказывает эффективность визуального осмотра экземпляра мореного дуба при должной оценке места его залегания.

В дальнейшем планируется создание объединенной территориальной базы на основе топографической карты Беларуси с территориальной разбивкой по содержанию оксида железа FeO , а также более плотная разбивка по возрасту, добавление второстепенных цветов мореного дуба – желтого, желто-черного, желто-серого, учет реологических характеристик натурального мореного дуба.

Заключение. Впервые предложен комплексный метод на основе возрастных и видовых отличий натурального мореного дуба.

Разработка методологии подхода к оценочной характеристике ценнейшего природного ископаемого (натурального мореного дуба) в зависимости от условий и среды его нахождения, возрастных и видовых параметров дает возможность использовать данный метод в полевых условиях с достаточной точностью, для дальнейшей сортировки и выбора метода сушки.

Результаты полученных исследований могут быть использованы при разработке стандартов о мореном дубе.

Список литературы

1. Методы исследования древесины и ее производных / Н. Г. Базарнова [и др.]. Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2002. 160 с.
2. Петруша А. К. Технические свойства древесины мореного дуба и его промышленное использование // Сб. науч. тр. БЛТИ им. С. М. Кирова. 1948. Вып. VII. С. 11–37.
3. Кулонометрическое определение дубильных веществ в лекарственном растительном сырье / С. Г. Абдуллина [и др.] // Фармация. 2010. № 4. С. 13–15.
4. Абаимов В. Ф. Дендрология. М.: Академия, 2009. 368 с.
5. Серговский П. С., Расев А. И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. М.: Лесная пром-сть, 1987. 360 с.
6. Горшин С. Н. Консервирование древесины. М.: Лесная пром-ть, 1977. 355 с.
7. Уголев Б. Н. Древесиноведение и лесное товароведение. М.: Академия, 2006. 272 с.
8. Кононов Г. Н. Химия древесины и ее основных компонентов. М.: МГУЛ, 1999. 247 с.
9. Марченко Ж. В., Панов В. С., Орлова Л. А. Начальные результаты по датированию археологических памятников эпохи голоцена на УМС в ЦКП СО РАН «Геохронология кайнозоя»: экспериментальные ^{14}C и сравнительный анализ данных // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. 2013. № XIX. С. 244–250.

10. Чичагова О. А., Зазовская Э. П. Радиоуглеродный метод // Естественные-научные методы исследования культурных слоев древних поселений. М., 2004. С. 34–46.
11. Дупанов С. А. Исследование зольных остатков мореного дуба различных возрастных периодов залегания в поймах рек // 71-я науч.-техн. конф. студентов и магистрантов: тез. докл., Минск, 20–25 апр. 2020 г. URL: <https://www.belstu.by/science/obschaya-informaciya/conferencesandexhibitions/2020-god/71-ya-nauchno-tehnicheskaya-konferenciya-studentov-and-magistrantov.html> (дата обращения: 05.04.2023).
12. Леонович О. К., Дупанов С. А. Исследование физико-химических свойств натурального мореного дуба, используемого для производства эксклюзивных изделий и мебели // Лесной комплекс: состояние и перспективы развития: материалы 19-й Междунар. науч.-техн. интернет-конф., Брянск (РФ), весна 2020 г. URL: <http://science-bsea.bgita.ru> (дата обращения: 07.04.2023).
13. Дупанов С. А., Леонович О. К. Исследование физико-химических и прочностных свойств мореного дуба различных возрастных групп для изготовления изделий // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: тез. докл. 85-й науч.-техн. конф. (с междунар. участием), Минск, 1–13 февр. 2021 г. Минск, 2021. С. 144–147.
14. Леонович О. К., Дупанов С. А. Исследование химических и структурных свойств натурального мореного дуба методом сканирующей микроскопии // Труды БГТУ. Сер. 1. Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (240). С. 150–155. DOI: 10.52065/2519-402X-2021-240-20-150-155.
15. Дупанов С. А., Леонович О. К. Классификационный подход к оценке качественных характеристик натурального мореного дуба // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: тез. докл. 87-й науч.-техн. конф. (с междунар. участием), Минск, 31 янв. – 17 февр. 2023 г. Минск, 2023. С. 146–149.

References

1. Bazarnova N. G., Karpova E. V., Katrakov I. B., Markin V. I., Mikushina I. V., Olkhov Yu. A., Khudenko S. V. *Metody issledovaniya drevesiny i yeye proizvodnykh* [Research methods of wood and its derivatives]. Barnaul, AltGU Publ., 2002. 160 p. (In Russian).
2. Petrusha A. K. Technical properties of stained oak wood and its industrial use. *Sbornik nauchnykh trudov BLTI im. S. M. Kirova* [Collection of scientific works of S. M. Kirov BFEI], 1948, issue VII, pp. 11–37 (In Russian).
3. Abdullina S. G., Agapova N. M., Ziyatdinova G. K., Khaziev R. Sh., Sidullina S. A., Budnikov G. K. Coulometric determination of tannins in medicinal plant raw materials. *Farmatsiya* [Pharmacy], 2010, no. 4, pp. 13–15 (In Russian).
4. Abaimov V. F. *Dendrologiya* [Dendrology]. Moscow, Akademiya Publ., 2009. 368 p. (In Russian).
5. Sergovskiy P. S., Rasev A. I. *Gidrotermicheskaya obrabotka i konservirovaniye drevesin* [Hydrothermal treatment and preservation of wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1987. 360 p. (In Russian).
6. Gorshin S. N. *Konservirovaniye drevesiny* [Preservation of wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 355 p. (In Russian).
7. Ugolev B. N. *Drevesinovedeniye i lesnoye tovarovedeniye* [Wood science and forest commodity science]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 272 p. (In Russian).
8. Kononov G. N. *Khimiya drevesiny i yeye osnovnykh komponentov* [Chemistry of wood and its main components]. Moscow, MGUL Publ., 1999. 247 p. (In Russian).
9. Marchenko Zh. V., Panov V. S., Orlova L. A. Initial results on dating of archaeological monuments of the Holocene epoch at the UMS in the Central Research Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences “Geochronology of the Cenozoic”: Experimental ^{14}C and comparative analysis of data. *Problemy arkheologii, etnografii, antropologii Sibiri i sopredel'nykh territoriy* [Problems of archeology, ethnography, anthropology of Siberia and adjacent territories], 2013, no. XIX, pp. 244–250 (In Russian).
10. Chichagova O. A., Zazovskaya E. P. Radiocarbon method. *Yestestvenno-nauchnyye metody issledovaniya kul'turnykh sloyev drevnikh poseleniy* [Natural-scientific methods of research of cultural layers of ancient settlements]. Moscow, NIA-Nature Publ., 2004, pp. 34–46 (In Russian).
11. Dupanov S. A. Investigation of ash residues of moraine oak of various age periods of occurrence in floodplains of rivers. *71-ya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya studentov i magistrantov: tezis dokladov* [71st scientific and technical conferences of students and undergraduates: abstracts]. Available at: <https://www.belstu.by/science/obschaya-informaciya/conferencesandexhibitions/2020-god/71-ya-nauchno-tehnicheskaya-konferenciya-studentov-and-magistrantov.html> (accessed 05.04.2023) (In Russian).
12. Leonovich O. K., Dupanov S. A. Investigation of physico-chemical properties of natural stained oak used for the production of exclusive products and furniture. *Lesnoy kompleks: sostoyaniye i perspektivy razvitiya: materialy 19-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy Internet-konferentsii* [Forest complex: state and prospects of development: materials of the 19th International scientific and technical Internet conference]. Available at: <http://science-bsea.bgita.ru> (accessed 07.04.2023) (In Russian).

13. Dupanov S. A., Leonovich O. K. Investigation of physico-chemical and strength properties of stained oak of various age groups for the manufacture of products. *Lesnaya inzheneriya, materialovedeniye i dizayn: tezis dokladov 85-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Forest Engineering. Materials Science and Design: abstracts of the 85th scientific and technical conference (with international participation)]. Minsk, 2021, pp. 144–147 (In Russian).

14. Leonovich O. K., Dupanov S. A. Investigation of chemical and structural properties of natural stained oak by scanning microscopy method. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2021, no. 2 (240), pp. 150–155. DOI: 10.52065/2519-402X-2021-240-20-150-155 (In Russian).

15. Dupanov S. A., Leonovich O. K. Classification approach to the assessment of the qualitative characteristics of natural stained oak. *Lesnaya inzheneriya, materialovedeniye i dizayn: tezis dokladov 85-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Forest Engineering. Materials Science and Design: abstracts of the 85th scientific and technical conference (with international participation)]. Minsk, 2023, pp. 146–149 (In Russian).

Информация об авторах

Дупанов Сергей Александрович – аспирант, инженер кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: ser.dupanov@gmail.com

Леонович Олег Константинович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: okl2001@mail.ru

Information about the authors

Dupanau Siarhei Alexandrovich – PhD student, Engineer, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., Minsk, 220006, Republic of Belarus). E-mail: ser.dupanov@gmail.com

Leonovich Oleg Konstantinovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: okl2001@mail.ru

Поступила 17.04.2023

УДК 674.812

Я. П. Жарская, И. Г. Федосенко

Белорусский государственный технологический университет

ПОЛУЧЕНИЕ ТОПЛИВНЫХ ГРАНУЛ С ВЫСОКИМИ КАЧЕСТВЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ИЗ ЩЕПЫ НИЗКОГО КАЧЕСТВА

Целью исследования является проверка возможности использования низкокачественной древесины как сырья для получения топливных гранул с высокими качественными характеристиками класса А2 согласно европейскому стандарту ISO 17225–2:2021. Актуальность вопроса переработки низкокачественной древесины в настоящее время достаточно высокая. Такая древесина не имеет положительного экономического эффекта, требует затрат на утилизацию, является крупнотоннажным отходом деревопереработки.

В порядке эксперимента топливные гранулы получали, используя щепу топливную хвойных пород, в которой присутствовали инородные включения и большое количество коры. Процесс получения топливных гранул сводился к удалению инородных включений из сырья, доизмельчению, гидротермической обработке сырья с последующим прессованием в кольцевой матрице до необходимой плотности гранул. Для подтверждения высокого качества полученного продукта сравнили его характеристики с пороговыми значениями согласно ISO 17225–2:2021.

Эксперимент показал, что при соблюдении определенной технологии производства можно получить гранулы класса А2 из низкокачественной топливной щепы, основное назначение которой заключается в получении тепловой энергии. Преимуществом является тот факт, что в технической документации нет требований к цвету гранул. Это положительно влияет на процесс производства ввиду того, что можно использовать разного рода сырье, не предъявляя строгих требований к его однородности, качеству и фракционному составу.

Ключевые слова: гранулы, топливная щепа, примеси, гидротермическая обработка, фракционный состав.

Для цитирования: Жарская Я. П., Федосенко И. Г. Получение топливных гранул с высокими качественными характеристиками из щепы низкого качества // Труды БГТУ. Сер. 2, Лесное хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 210–216. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-24.

Ya. P. Zharskaya, I. G. Fedosenko

Belarusian State Technological University

PRODUCTION FUEL GRANULES WITH HIGH QUALITY CHARACTERISTICS FROM LOW-QUALITY WOOD

The purpose of the study is to test the possibility of using low-quality wood as a raw material to produce fuel pellets with high quality characteristics of class A2 according to the European standard ISO 17225–2:2021. The relevance of the issue of processing low-quality wood is currently quite high. Such wood does not have a positive economic effect, requires disposal costs, and is a large-tonnage wood processing waste.

As an experiment, fuel pellets were obtained using softwood fuel chips as raw materials, in which foreign inclusions and a high content of bark were present. The process of obtaining fuel granules was reduced to the removal of foreign inclusions from the raw material, regrinding, hydrothermal processing of the raw material, followed by pressing in a ring matrix to the required density of the granules. To confirm the high quality of the obtained product, its characteristics were compared with the threshold values according to ISO 17225-2:2021.

The experiment showed that, subject to a certain production technology, class A2 can be obtained from low-quality fuel chips, the main purpose of which is to obtain thermal energy. The advantage is the fact that there are no requirements for the color of the granules in the technical documentation. This has a positive effect on the production process due to the fact that various types of raw materials can be used without imposing strict requirements on its uniformity, quality and fractional composition.

Keywords: granules, fuel chips, impurities, hydrothermal treatment, fractional composition.

For citation: Zharskaya Ya. P., Fedosenko I. G. Production fuel granules with high quality characteristics from low-quality wood. *Proceedings of BSTU, issue 2, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 210–216. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-24 (In Russian).

Введение. Особенностью механической обработки древесины является снятие слоя материала с готовой продукции, что неизбежно приводит к образованию отходов, количество которых может достигать 70% объема сырья [1]. Эффективное использование отходов деревообработки и неликвидного древесного сырья в энергетических целях, как биомассы, является приоритетным направлением уже в нескольких пятилетках. К основным отходам лесопиления относятся кусковые отходы (22–32%) и опилки (22–24%) [2]. Промежуточным продуктом можно считать технологическую щепу, качество которой позволяет ее широко использовать по многим направлениям. Популярными направлениями использования отходов деревообработки являются: целлюлозно-бумажное и плитное производство, производство топлива и, в частности, древесных гранул.

В настоящее время сложилась ситуация, в которой топливные гранулы производят из технологической щепы или чистой измельченной древесины в виде щепы или дробленки, а то и стружки. При этом топливная щепка, которая используется в том виде, в котором получена, содержит много примесей как органической, так и минеральной природы. Кроме того, недостаточно внимания уделяется измельченной древесине как сырью для получения прессованного топлива.

Наиболее перспективным является использование топливной щепы в энергетических целях как экологически нейтрального топлива. Топливная щепка представляет собой низкокачественные измельченные кусковые отходы, которые образуются в результате лесозаготовок, в процессе механической обработки древесины, а также при измельчении низкотоварной древесины [3]. Топливная щепка может содержать значительный объем коры – 55–60%. Однако при подборе технологических режимов производства и необходимого количества вспомогательных добавок можно получить гранулы высоких классов – А1 и А2 согласно европейскому стандарту ISO 17225–2:2021 [4].

Исследованиями в области технологии производства гранул занимались многие ученые. О. Д. Мюллер [5] рассматривал в своей работе ряд факторов, которые влияют на качество пеллет: давление прессования, вспомогательные добавки, температура. Так, он утверждал, что влажность вспомогательных добавок (древесная мука, кукурузный крахмал) должна быть в диапазоне от 10 до 12%. Давление прессования должно быть в пределах 25–30 МПа. Наряду с этим обязательным этапом производства пеллет должно быть принудительное охлаждение готового продукта

при выходе из пресса. Все вышеперечисленные меры приводят к повышению качественных показателей гранул.

Вместе с О. Д. Мюллером значительный вклад в изучение вопроса производства гранул внес А. Н. Попов [6]. Он так же утверждал, что выдержка готового продукта при низких температурах позволит достичь лучшего качества, а именно увеличит механическую прочность гранул и их насыпную плотность. Последний критерий, в свою очередь, оказывает влияние на вместимость пеллет при их загрузке и транспортировке [7]. Он определил начальные свойства исходного сырья, такие как влажность не ниже 10–12%, температура прессования 85–95°C.

Л. А. Скорикова [8] в своих исследованиях описывает положительное влияние предварительной подготовки и сортировки древесного сырья. Уменьшение влажности исходного древесного материала до 10–12% с предварительной сортировкой по размерам частиц и по породам древесины может значительно повлиять на энергопотребление оборудования, что в свою очередь может оказать положительный эффект на технологию производства в целом. Разное по породной принадлежности и по фракционному составу сырье требует различных температурных режимов сушки и давления прессования. Важно заметить, что более энергозатратные режимы работы оборудования из-за увеличения выбросов в атмосферу негативно сказываются на экологии.

Тема энергозатрат на получение пеллет также была описана учеными D. Andreiko и J. Grochowicz [9], которые утверждали, что процесс гранулирования зависит от содержания влаги в сырье. Они пришли к выводу, что увеличение влажности материала перед прессованием снижает энергозатраты на этот процесс с 10 до 15%. Аналогичные выводы сделала и P. Rousset [10].

Представленные источники [5–10] дают основание полагать, что при разработке подходящей технологии производства, правильном подборе вспомогательных добавок можно получить качественные гранулы высоких классов из низкокачественной измельченной древесины, исключительным вариантом использования которой считается получение тепловой энергии.

Основная часть. Основной задачей эксперимента стало получение гранул класса по ISO 17225–2:2021 не ниже А2 из низкокачественной измельченной древесины (топливной щепы). Для проведения эксперимента использовалась щепка топливная, порода древесины – сосна. Влажность щепы составила от 35 до 45%. На рис. 1 представлена щепка топливная, которая подверглась первичному дроблению для создания необходимой фракции.



а



б

Рис. 1. Щепа топливная после дробления:
а – склад щепы; б – сравнение щепы технологической (слева) и топливной (справа)

Главным отличием гранул класса А2 от гранул класса А1 является такой показатель, как зольность. Для гранул класса А1 согласно ISO 17225-2:2021 показатель зольности не должен превышать 0,7%, для гранул класса А2 – не более 1,2%. Высокое содержание коры и присутствие инородных примесей в объеме топливной щепы существенно влияет на качество пеллет в целом и на зольность в частности [11].

Подготовка сырья подразумевает очистку щепы от инородных включений и первичное дробление до более мелкой фракции. Дробление проводилось на речипере мелкого дробления Bruks BK-DG 600×1200, который оборудован магнитом для улавливания металлических включений. На рис. 2 показан магнит речипера и металл, который был обнаружен после прохождения всего объема сырья через речипер.

Следующим технологическим этапом получения гранул является термическая обработка на сушильном барабане. Учитывая тот факт, что эксперимент проводился на работающей техно-

логической площадке ООО «СВУДС экспорт», которая специализируется на производстве гранул класса А1 из технологической щепы, одной из основных задач стала разработка режимов работы сушильного барабана, которые смогут безопасно высушить материал с содержанием коры 55–60%.



а



б

Рис. 2. Металлические включения в объеме топливной щепы:
а – магнит речипера;
б – металлические включения

Производство топливных гранул ООО «СВУДС экспорт» работает на щепе собственного производства, которая образуется после пиления круглого лесоматериала (естественная влажность 50–55%). Поэтому имеющиеся температурные режимы разработаны под указанную естественную влажность исходного сырья. Таким образом, необходимо было разработать новые технологические режимы. При проведении трех экспериментов был получен оптимальный режим

работы сушильного комплекса, который позволил получить сырье с влажностью 10–12%. По результатам эксперимента оптимальный режим работы – это низкотемпературный режим № 3 (табл. 1).

Таблица 1
Технологические режимы работы сушильного оборудования

Параметры	Единица измерения	Режим		
		№ 1	№ 2	№ 3
Температура в котле	°С	1050	1000	950
Температура перед сушильным барабаном	°С	540	490	450
Количество подаваемого материала	м ³ /т	12–14	11–13	10–12
Начальная влажность опилок	%	35–45		
Конечная влажность опилок	%	14,5	13	11,5

Следующим этапом проводится доизмельчение высушенной древесины до фракции, подходящей для прессования. Доизмельчение выполняется на молотковой дробилке СРМ Champion с размером ячейки сит 5–7 мм.

Важную роль играет норма расхода вспомогательных добавок. Для проведения эксперимента в качестве вспомогательной добавки было выбрано природное вяжущее, традиционно присутствующее в растениях, – крахмал, в частности, кукурузный [12]. Согласно ISO 17225–2:2021, количество вводимых добавок не должно превышать 2% от массы.

В ходе эксперимента была подобрана оптимальная норма расхода кукурузного крахмала. За отправную точку для определения оптимальной нормы расхода было взято значение 5 кг/т. Данная норма расхода является утвержденной и применяемой на производстве топливных древесных гранул на ООО «СВУДС экспорт». С учетом допустимого количества вспомогательных добавок, согласно технической документации, дополнительно были получены образцы топливных гранул с содержанием крахмала 2,5, 4,0 и 6,0 кг/т. Подобранные параметры прессования указаны в табл. 2. По результатам эксперимента оптимальный режим прессования – режим № 3. Норма расхода крахмала кукурузного, при которой полученный образец гранул соответствует требуемому качеству, – 5,0 кг/т.

Таблица 2
Технологические режимы процесса прессования топливных гранул

Параметры	Единица измерения	Режим			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Загруженность пресса	%	90–95			
Давление прессования	МПа	25–30	30–35	25–30	25–30
Температура перед прессом	°С	50	53	55	57
Норма расхода крахмала	кг/т	2,5	4,0	5,0	6,0

Основой процесса гранулирования древесины являются процессы плавления лигнина – одного из основных веществ, входящих в состав древесины, и его отвердевания [12]. На рис. 3 представлен пресс-гранулятор СРМ 7932-5, оборудованный двумя роликами и кольцевой матрицей. Производительность данного оборудования составляет 4,5 т готовой продукции за 1 ч.



Рис. 3. Пресс-гранулятор СРМ 7932-5

Необходимую температуру и влажность древесной массы перед прессованием регулируют установленным парогенератором Steam 500. Подача пара осуществляется в смесительную камеру, куда подается крахмал кукурузный и древесные опилки. Воздействие пара позволяет разогреть материал до температуры в 50–60°С. Дополнительный прогрев материала осуществляется в рабочей зоне пресса за счет трения и давления между материалом, матрицей и прессующими роликами [13].

Завершающим этапом эксперимента стало охлаждение гранул в холодильных установках в течение 45 мин при постоянном перемешивании для равномерного остывания. Холодильная

установка фирмы Champion оснащена системой «подвижные полы», которая по мере перемещения обеспечивает прохождение потока атмосферного воздуха через объем гранул, тем самым осуществляется равномерное охлаждение всего объема пеллет, находящихся одновременно в установке. Согласно технической документации для безопасной транспортировки и хранения, температура гранул после охлаждения не должна превышать 40°C. Равномерный обдув атмосферным воздухом позволяет добиться снижения температуры готовой продукции. Для упаковки готовой продукции температура гранул не должна превышать 20–22°C [14].

На рис. 4 показаны гранулы класса А1 и полученный образец гранул, который полностью соответствует требованиям по качеству, предъявляемым к гранулам класса А2. Контроль качества проводился согласно методикам ISO 17831–1:2015 [15].



а



б

Рис. 4. Топливные гранулы из древесины:
а – гранулы класса А1; б – гранулы класса А2

В табл. 3 представлено сравнение качественных показателей топливных гранул класса А1 и А2 согласно ISO 17225–2:2021 с полученным образцом. Оценка качества проводилась согласно

разработанным производственным методикам на основе EN Plus v3 ISO 17225–2:2021 в современной, полностью укомплектованной производственной лаборатории ИООО «СВУДС экспорт». Применяемое лабораторное оборудование имеет поверку БелГИМ от 14 апреля 2022 г.

Таблица 3

Сравнение качественных показателей

Параметр	Единица измерения	ENplus A1	ENplus A2	Топливная гранула
Диаметр	мм	6 ± 1; 8 ± 1		6
Влажность	%	≤10		6,0
Зольность	%	≤0,7	≤1,2	0,9
Механическая прочность	%	≥98	≥97,5	98,7
Мелкая фракция	%	≤0,5 (≤1)		0,1
Насыпная плотность	кг/м ³	600 ≤ НП ≤ 750		622

Заключение. В ходе эксперимента были подобраны технологические параметры работы оборудования, на основании которых была произведена партия топливных гранул из низкосортной измельченной древесины (топливная щепа). Общий объем партии составил 54,5 т. Внедрение технологии подтверждено Актом о практическом использовании результатов исследования в технологический процесс производства топливных древесных гранул ООО «СВУДС экспорт».

Анализ научных источников определил перечень технологических параметров, которые в течение всего эксперимента проверялись опытным путем на функционирующем производстве с целью их корректировки под определенный вид сырья – топливная щепа с высоким содержанием коры. Производство топливных гранул из технологической щепы является темой достаточно изученной и уже внедренной на предприятиях Республики Беларусь. Вопрос о производстве гранул из низкосортной древесины, которая является основным источником получения топливной щепы, потребовал изучения, так как данный материал как вид сырья сравнительно новый и не в полной мере изучен.

Получение топливных гранул с высокими качественными характеристиками из щепы низкого качества проходило в несколько этапов. На начальном этапе была произведена подготовка древесного материала, которая включала в себя прохождение объема топливной щепы через магнит рубильной машины с последующим доизмельчением до необходимой фракции. При прохождении через магнит были отсортированы все металлические включения, которые при последующем попадании в оборудование могли повлиять на ход эксперимента.

Следующий этап – термическая обработка опилок на сушильном барабане согласно разработанным технологическим параметрам. После термической обработки древесные опилки были поданы к участку прессования, где согласно режимам прессования, разработанным под данный эксперимент, было осуществлено прессование древесного материала с предварительным добавлением крахмала кукурузного (норма расхода 5 кг/т) и разогревом полученной смеси до температуры 55°C.

После процесса прессования топливные гранулы прошли процесс охлаждения до температуры 20–22°C.

Результатом эксперимента стала партия топливных гранул, которые по всем параметрам качества соответствуют продукту, пригодному для реализации на отечественном и Европейском рынках. Контроль качества проводился, опираясь на критерии оценки согласно европейскому стандарту ISO 17225–2:2021.

Детальная проработка вопроса эффективного использования низкосортной топливной щепы показала, что данный вид отходов является подходящим сырьем для производства топливных гранул при правильно подобранных режимах работы производства.

Список литературы

1. Древесина и древесные материалы: сб. ст. / Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР. Красноярск, 1974, 238 с.
2. Коробов В. В., Рушнов Н. П. Переработка низкокачественного сырья (проблемы безотходной технологии). М.: Экология, 1991. 288 с.
3. Алексеев И. А. Качественная оценка лесов. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. 69 с.
4. Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 2: Graded wood pellets: ISO 17225–2:2021. Vernier, Geneva: ISO, 2021. 16 с.
5. Мюллер О. Д. Математическая модель процесса формирования древесных гранул // Лесной журнал. 2015. № 2. С. 37–44.
6. Попов А. Н. Исследование процесса производства древесных гранул с целью повышения их энергетического использования: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 151 с.
7. Thek G., Obernberger I. The pellet Handbook. The Production and Thermal Utilisation of Pellets. London: Washington DC: Routledge, 2010. 593 с.
8. Скорикова Л. А. Обоснование состава топливных гранул и технологии подготовки древесных опилок для их производства: дис. ... канд. техн. наук. Йошкар-Ола, 2012. 152 с.
9. Andreiko D., Grochowicz J. Studies of H-NMR Relaxation Dispersion in Human Brain-tissue Samples: Implications for Magnetic Resonance Relaxation Dispersion Imaging. Magnus Ljungvall, Hamburg: 2012. 22 с.
10. Rousset P. Study of again research material: wood, metal, plastic. Zloven, Slovakia: Friedrich and Luible, 2008. 141 с.
11. Мюллер О. Д. Совершенствование технологии производства древесных гранул: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2015. 269 с.
12. Крахмал кукурузный. Общие технические условия: ГОСТ 32159–2013. М.: Стандартиформ, 2019. 11 с.
13. Чибирев О. В., Куницкая О. А., Ильюшенко Д. А. Экспериментальные исследования прессования опилок древесины сосны на гидравлическом прессе // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2016. № 217. С. 87–92.
14. Swaan J. Best Practices for Fighting and Preventing a Fire in a Wood Pellet Storage Dome or Silo. Washington DC: Future Metrics LLC, 2017. 34 с.
15. Биотопливо твердое. Определение механической прочности пеллет и брикетов: ISO 17831–1:2015. М.: Стандартиформ, 2018. 12 с.

References

1. *Drevesina i drevesnyye materialy: sbornik statey* [Wood and wood materials: digest of articles]. Krasnoyarsk, 1974. 238 p. (In Russian).
2. Korobov V. V., Rushnov N. P. *Pererabotka nizkokachestvennogo syr'ya (problemy bezotkhodnoy tekhnologii)* [Processing of low-quality raw materials (problems of waste-free technology)]. Moscow, Ekologia Publ., 1991. 288 p. (In Russian).
3. Alekseev I. A. *Kachestvennaya otsenka lesov* [Qualitative assessment of forests]. Yoshkar-Ola, MarGTU Publ., 2006. 69 p. (In Russian).
4. ISO 17225–2:2021. Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 2: Graded wood pellets. Vernier, Geneva, ISO, 2021. 16 p.
5. Muller O. D. Mathematical model of the wood pellet formation process. *Lesnoy zhurnal* [Forest Journal], 2015, no. 2, pp. 37–44 (In Russian).

6. Popov A. N. *Issledovaniye protsessa proizvodstva drevesnykh granul s tsel'yu povysheniya ikh energeticheskogo ispol'zovaniya. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Study of the production process of wood pellets in order to increase their energy use. Dissertation PhD (Engineering)]. Moscow, 2016. 151 p. (In Russian).
7. Thek G., Obernberger I. *The pellet Handbook. The Production and Thermal Utilisation of Pellets*. London, Washington DC, Routledge, 2010. 593 p.
8. Skorikova L. A. *Obosnovaniye sostava toplivnykh granul i tekhnologii podgotovki drevesnykh opilok dlya ikh proizvodstva. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Substantiation of the composition of fuel granules and technology for the preparation of sawdust for their production. Dissertation PhD (Engineering)]. Yoshkar-Ola, 2012. 152 p. (In Russian).
9. Andreiko D., Grochowicz J. *Studies of H-NMR Relaxation Dispersion in Human Brain-tissue Samples: Implications for Magnetic Resonance Relaxation Dispersion Imaging*. Hamburg, Magnus Ljungvall, 2012. 22 p.
10. Rousset P. *Study of again research material: wood, metal, plastic*. Zloven, Slovakia, Friedrich and Luible, 2008. 141 p.
11. Muller O. D. *Sovershenstvovaniye tekhnologii proizvodstva drevesnykh granul. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Improving the technology for the production of wood pellets. Dissertation PhD (Engineering)]. Arkhangelsk, 2015. 269 p. (In Russian).
12. GOST 32159–2013. *Corn starch. General specifications*. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 11 p. (In Russian).
13. Chibirev O. V., Kunitskaya O. A., Ilyushenko D. A. *Experimental studies of pressing pine sawdust on a hydraulic press. Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy], 2016, no. 217, pp. 87–92 (In Russian).
14. Swaan J. *Best Practices for Fighting and Preventing a Fire in a Wood Pellet Storage Dome or Silo*, Washington DC, Future Metrics LLC, 2017. 34 p.
15. ISO 17831–1:2015. *Solid biofuels. Determination of the mechanical strength of pellets and briquettes*. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 12 p. (In Russian).

Информация об авторах

Жарская Яна Петровна – аспирант, магистр технических наук кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь); начальник производства топливных древесных гранул. ООО «СВУДС экспорт» (222515, г. Борисов, ул. Демина, 11А, Республика Беларусь). E-mail: yana.zarskaya@swse.by

Федосенко Иван Гаврилович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Ivan.fedosenko@mail.ru

Information about the authors

Zharskaya Yana Petrovna – PhD student, Master of Engineering the Department of Woodworking Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus); Head of production of fuel wood pellets. LLC “SWOODS export” (11A, Demina str., 222515, Borisov, Republic of Belarus). E-mail: yana.zarskaya@swse.by

Fedosenko Ivan Gavriilovich – PhD (Engineering), Associate Professor, the Department of Woodworking Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Ivan.fedosenko@mail.ru

Поступила 20.03.2023

УДК 674.048

I. Bazhelka¹, A. Kanavalava¹, L. Radkevich²¹Belarusian State Technological University²A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National Academy of Science of Belarus**EVALUATION OF COMPOSITIONS FOR BLEACHING WOOD AFFECTED BY WOOD-COLORING AND MOLD FUNGI**

This article presents the results of tests to evaluate compositions for bleaching wood affected by wood-coloring and mold fungi. In the course of the work, the analysis of bleaching agents used in the pulp and paper, textile, and also in the woodworking industries was carried out. The advantages and disadvantages of using various bleaching agents for various types of wood are considered. As a result of the analysis of bleaching agents, four experimental compositions based on hydrogen peroxide (H₂O₂), six formulations based on sodium hypochlorite (NaClO) (in three of which stabilizing additives were added). Experimental compositions were applied immediately after their preparation to samples of wood completely affected by wood-coloring and mold fungi. The treatment was carried out by applying a bleaching solution with a brush along the fibers to the surface of the sample on one side. The tests were carried out at room temperature and humidity 60 ± 5%. 24 hours after the application of the formulations, the effectiveness of these formulations was evaluated. As a result of the tests, compositions based on sodium hypochlorite showed a higher bleaching effect in comparison with compositions based on hydrogen peroxide.

Keywords: bleaching of wood, chlorine-containing compounds, compounds without chlorine.**For citation:** Bazhelka I., Kanavalava A., Radkevich L. Evaluation of compositions for bleaching wood affected by wood-coloring and mold fungi. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 217–223. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-25 (In English).**И. К. Божелко¹, А. А. Коновалова¹, Л. В. Радкевич²**¹Белорусский государственный технологический университет²Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси**ОЦЕНКА СОСТАВОВ ДЛЯ ОТБЕЛИВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ, ПОРАЖЕННОЙ ДЕРЕВООКРАШИВАЮЩИМИ И ПЛЕСНЕВЫМИ ГРИБАМИ**

В данной статье представлены результаты испытаний по оценке составов для отбеливания древесины, пораженной деревоокрашивающими и плесневыми грибами. В ходе работы был проведен анализ отбеливающих агентов, применяемых в целлюлозно-бумажной, текстильной, а также деревообрабатывающей промышленности. Рассмотрены преимущества и недостатки использования различных отбеливающих агентов для разных пород древесины. В результате проведения анализа отбеливающих агентов были приготовлены 4 экспериментальных состава на основе перекиси водорода (H₂O₂), 6 составов на основе гипохлорита натрия (NaClO) (в 3 из которых были добавлены стабилизирующие добавки). Экспериментальные составы были нанесены сразу после их приготовления на образцы древесины, полностью пораженной деревоокрашивающими и плесневыми грибами. Обработку проводили путем нанесения отбеливающих растворов кистью вдоль волокон на поверхность образца с одной стороны. Испытания проводили при комнатной температуре и влажности 60 ± 5%. Спустя 24 ч после нанесения составов была произведена оценка их эффективности. В результате проведения испытаний составы на основе гипохлорита натрия проявили более высокий эффект отбеливания в сравнении с составами на основе перекиси водорода.

Ключевые слова: отбеливание древесины, хлоросодержащие составы, составы без хлора.**Для цитирования:** Божелко И. К., Коновалова А. А., Радкевич Л. В. Оценка составов для отбеливания древесины, пораженной деревоокрашивающими и плесневыми грибами // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 217–223. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-25.

Introduction. Currently, softwood is widely used in woodworking, especially in the manufacture of furniture and joinery. However, the features of the anatomical structure and chemical composition of

coniferous wood, the presence of a large number of knots, resinous areas, cracks, fungal stains have a significant impact on the processing process, as well as on the quality of products [1].

The resistance of wood is called its ability to resist destruction under the influence of various physical, chemical, biological and mechanical factors. Under the influence of the combined influence of changes in air humidity and temperature, direct exposure to precipitation and solar radiation, cracks appear on the surface of the wood, increasing over time, the integrity of the wood is violated and its gradual destruction occurs, thereby creating favorable conditions for the impact of various types of biological factors (bacteria, fungi, insects). The main type of reduction in the quality and cost of timber is the defeat of its wood-coloring and mold fungi, leading to a change in color, both the surface of the material and loosening and deformation of the structure in its volume, but not leading to the loss of the operational properties of wood. Cellulose and hemicellulose do not affect the color of technical cellulose [2]. The color of cellulose is given by chromophore groups of lignin, which are formed as a result of the oxidation of phenolic hydroxyl groups of lignin into quinones, as well as metals of variable valence that form colored complexes with phenolic groups.

There are many ways to restore the natural color of wood without changing its structure and natural properties. The process of bleaching the surface of wood consists in the discoloration of lignin or in the destruction and destruction of colonies of mold and wood-coloring fungi, followed by their discoloration. Bleaching agents are compounds that bleach or lighten the substrate by dissolving the substances that give color or by changing their light-absorbing properties. Bleachers are widely used in the pulp and paper industry, the textile industry, as well as in the woodworking industry. Wood bleaching agents are divided into two types: compounds without chlorine and chlorine-containing compounds.

The chemistry of bleaching agents consists mainly of oxidizing agents that destroy fungi and discolor wood fibers: chlorine (Cl_2) and some of its compounds or peroxide compounds, such as hydrogen peroxide (H_2O_2), ozone (O_3) and sodium perborate (NaBO_3). The bleaching reaction usually involves the removal of chromophore sites in which electron delocalization by conjugated double bonds has made the substrate capable of absorbing visible light [3]. The bleaching agent usually reacts by irreversibly splitting or attaching these double bonds. Sodium hypochlorite (NaClO), calcium hypochlorite ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$), chlorine dioxide (ClO_2) or bleach ($\text{Ca}(\text{OCl})_2 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) are usually used as the main active ingredient in chlorine-containing bleaches. Bleachers without chlorine contain hydrogen peroxide (H_2O_2), ammonia (NH_3), oxalic acid ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$) and others [4]. These substances bleach wood due to the reaction of its oxidation by a peroxide group and a small amount of oxygen formed during the decomposition of peroxide compounds. When bleaching

materials with hydrogen peroxide, activators of various nature are used to accelerate and facilitate the bleaching process.

In the process of bleaching cellulose-containing materials with hydrogen peroxide compositions, the TAED ($(\text{CH}_3\text{C}(\text{O}))_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{N}(\text{C}(\text{O})\text{CH}_3)_2$) bleaching activator is widely used, which significantly reduces the temperature of the process, and also gives the composition bactericidal, virucidal and fungicidal properties [5]. This method of bleaching has several advantages, it is a softer treatment of cellulose and a lower consumption of bleaching agents, while maintaining the strength of the fibers. It should be noted that despite the fact that bleaching with hydrogen peroxide is the most economical method, its use is limited by the physico-chemical properties of wood. Wood of some species when bleached with peroxide, can acquire a wide variety of shades of color. For example, oak peroxide compounds are not bleached, but painted green, walnut with its contrasting texture gives gray-blue or pink shades of color when bleached, and anatolian walnut acquires a bright golden color. At the same time, peroxide compounds are ideal for bleaching birch, beech or walnut [6].

The use of peracetic acid ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_3$) as a promising highly effective bleaching agent is known when processing cellulose pulp in the technology of complete absence of chlorine [7], the possibility of enzymatic bleaching using the fungal laccase – mediator system with subsequent bleaching with hydrogen peroxide [8] is also being considered, which allows to increase the level of pulp bleaching by more than 2.5 times and low the content of lignin. However, these developments are insufficiently studied, although they have significant potential.

Some bleaching compounds act by chemical reduction. These include sulfur dioxide (SO_2), sulfurous acid (H_2SO_3), hydrosulfite (HSO_3), sulfite (Na_2SO_3) and sodium dithionate ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_6$), as well as sodium tetrahydroborate, borohydride (NaBH_4) and their use is mainly associated with the production of paper pulp and textiles, where it is believed that the bleaching effect occurs due to the reduction of the chromophore carbonyl group. To date, these technologies have not been widely used.

Thus, compositions based on a solution of sodium hypochlorite can be considered the most affordable and bleaching of almost any wood. The preparation of such compositions does not require special equipment and can be used in almost any enterprise of the woodworking industry.

Main part. The purpose of this work is to study and analyze bleaching compounds and identify the most effective among them for bleaching wood affected by wood-coloring and mold fungi.

During this experiment, the wood of the common pine (*Pinus sylvestris* L.), affected by wood-coloring and mold fungi over the entire surface was used as

the material to be processed. Wood samples were cut from one uniformly affected board measuring 50 mm (length) × 50 mm (width) × 20 mm (thickness). For processing, aqueous solutions of bleaching compounds prepared immediately before application to the samples were used. The treatment was carried out by applying a bleaching solution with a brush to the surface of the sample on one side. The bleaching effect of the solutions was assessed visually by changing the color of the affected surface of the wood sample after 1 hour and after 24 hours (sustained to increase the penetration depth of the solution). The tests were carried out at room temperature and humidity $60 \pm 5\%$.

To assess the effectiveness of bleaching agents, aqueous solutions based on hydrogen peroxide or sodium hypochlorite were studied, the component composition of which is presented in Table 1 and Table 2.

Table 1
Hydrogen peroxide-based formulations used in bleaching damaged wood

Composition number	Component composition of bleaching aqueous solutions	
	Stage 1	Stage 2
1	Hydrogen peroxide 30% Sodium hydroxide Sodium liquid glass	Hydrogen peroxide 30%
2	Water ammonia 25%	Hydrogen peroxide 30% Potash
3	Sulfuric acid Hydrogen peroxide 30% Oxalic acid	Hydrogen peroxide 30%
4	EDTA (heat the solution to 50–60 °C before use)	Hydrogen peroxide 30% Sodium hydroxide

Table 2
Sodium hypochlorite-based formulations used in bleaching damaged wood

Composition number	Component composition of bleaching aqueous solutions
5	Sodium hypochlorite 40% Sodium hydroxide 50%
6	Sodium hypochlorite 40% Activator № 1 – based on isocyanuric acid Sodium hydroxide 50%
7	Sodium hypochlorite 40% Activator № 2 – based on bromine EDTA Boric acid

The process of processing samples with solutions containing hydrogen peroxide was carried out in two stages without washing and pre-drying, by successive application of solutions to the surface of the sample.

The process of processing wood samples with solutions based on sodium hypochlorite consisted of one stage.

At the first stage of the research, bleaching compositions based on hydrogen peroxide were tested (compositions No. 1–4). In composition No. 1, hydrogen peroxide and sodium silicate were used together at the first stage of treatment, which, as is known [9], allows increasing the activity of the bleaching process of wood aged under atmospheric conditions, but it will restore the brightness and hardness of the material. At the second stage of bleaching, dilute hydrogen peroxide was used.

Since the pretreatment of the wood surface with ammonia before interacting with hydrogen peroxide makes it possible to prepare (mercerize) the surface, and the introduction of a carbonate group makes it possible to stabilize the hydrogen peroxide solution or prolong the bleaching effect of the agent somewhat, when preparing the second experimental composition (No. 2), the following were used: in the first stage of treatment – aqueous ammonia; in the second stage – peroxide hydrogen and potash.

The composition of agent No. 3 at the first stage included a mixture of dilute acids, which, when processing the surface of the samples, increase the surface activity of wood due to interaction with the OH groups of cellulose. The second stage of bleaching included treatment with dilute hydrogen peroxide.

Pretreatment with a hot EDTA solution leads to the binding of polyvalent metal cations on the wood surface, destabilizing the hydrogen peroxide solution and reducing its activity. In this regard, for the preparation of the fourth experimental composition (No. 4), EDTA was used as the main components for the first stage. For the second stage – dilute hydrogen peroxide stabilized with sodium hydroxide.

At the second stage of the research, bleaching formulations containing sodium hypochlorite were used – formulations No. 5–7.

It is known that an excess of free base (sodium hydroxide) increases the pH of the sodium hypochlorite solution to 12.5–13.5 and acts as a stabilizer, and in addition, prevents the formation of hypochlorous acid [10] and allows mercerizing the surface of wood samples.

To prepare the fifth composition (No. 5), sodium hypochlorite and sodium hydroxide were used.

Bleaching activators were additionally introduced into bleaching formulations No. 6 and 7, which increase the efficiency of the process.

Composition No. 6 consisted of: sodium hypochlorite, activator No. 1 and sodium hydroxide.

As part of the seventh experimental composition (No. 7), sodium hypochlorite, activator No. 2, EDTA and boric acid were used.

Fig. 1 shows photographs of a control sample of pine wood affected by wood-coloring and wood-destroying fungi, and wood samples treated with experimental bleaching compounds. Photos of samples treated with bleaching compounds were taken 24 hours after treatment.

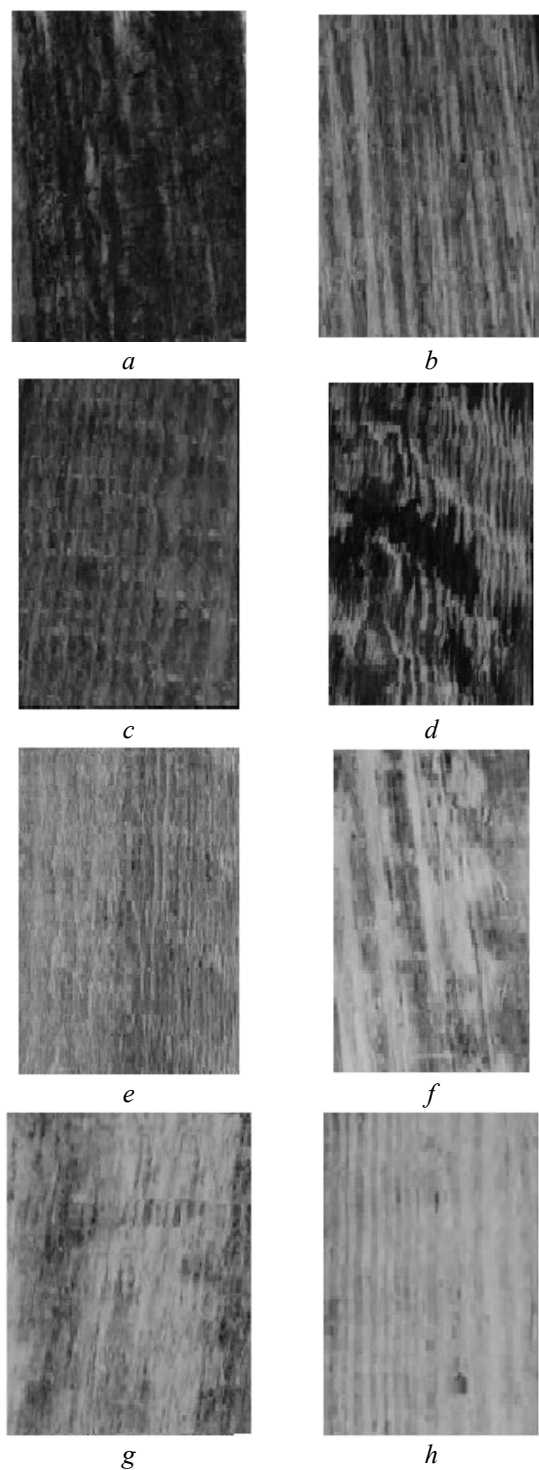


Fig. 1. Control sample of affected wood (*a*) and samples treated with experimental bleaching compounds (*b–e* – compositions based on hydrogen peroxide No. 1–5; *f–h* – compositions based on sodium hypochlorite No. 5–8)

As can be seen from Fig. 1, bleaching compositions No. 1–4 based on hydrogen peroxide are ineffective under these experimental conditions. The treatment of wood samples with composition No. 3, which has a complex composition of the solution of the first stage, not only did not lead to the restoration of the color of the wood, but also caused some of the affected areas to turn dark brown. A higher bleaching ability among compositions based on hydrogen peroxide was noted in composition No. 4. This is due to pretreatment with a hot EDTA solution, which provided deeper penetration of the hydrogen peroxide solution in the second stage. As noted above, bleaching agents based on peroxide compounds show good results when processing textiles or cellulose pulp. They work in a thin layer, for example, when processing plywood, and are little used in the processing of timber, where anisotropy of properties, heterogeneity of anatomical structure and chemical composition have a great influence on the finishing process.

Compositions based on sodium hypochlorite No. 5–7 have a higher bleaching effect. Compositions No. 6 and 7 containing bleaching activators of various nature are most effective. The action of activator № 1 in composition No. 6 can be explained by the fact that chlorine-substituted derivatives of the sodium salt of cyanuric acid in an aqueous solution undergo hydrolysis with the formation of the sodium salt of cyanuric (isocyanuric) acid and the release of active chlorine, which leads to an increase in the oxidative effect during a neutral reaction of the medium. In addition, hydrolysis is quite slow, and the effect of such a drug will have a prolonging effect. However, it is necessary to note the highly toxic properties of the activator based on isocyanuric acid [11], as well as its high cost. Thus, the most affordable and effective is bleaching compound No. 7.

Aqueous solutions based on sodium hypochlorite have a short shelf life. It is known that the addition of polyatomic alcohols (for example, galactite, mannitol, sorbitol, inositol and pentaerythritol) is used to stabilize aqueous solutions of hypochlorites, as well as products based on them, and the addition of amides or amines, bromides, arylsulfanilamides or their derivatives, isocyanuric acid, etc. increases the light resistance of hypochlorites [12]. Also, orthophosphoric acid salts, sodium silicates or boric acid are additionally introduced to stabilize sodium hypochlorite solutions [13]. Examples of possible pH correctors of aqueous solutions of sodium hypochlorite are mixtures of compounds of sodium tetraborate, sodium bicarbonate and sodium carbonate [14], sodium monohydrophosphate or sodium dihydrophosphate [15], sodium silicate [16]. In addition, boron compounds are known for their antiseptic properties.

For a comparative evaluation of the effectiveness of bleaching properties, three compositions based

on sodium hypochlorite with compounds that increase its stability in aqueous solutions were prepared. As stabilizers were used: stabilizer No. 1 and stabilizer No. 2 are based on boric compounds, stabilizer No. 3 is based on sodium salts.

For the preparation of composition No. 8, sodium hypochlorite, activator No. 2, EDTA and stabilizer No. 1 were used. For the preparation of composition No. 9, sodium hypochlorite, activator No. 2, stabilizer No. 2, sodium hydroxide and sodium liquid glass were used. In the preparation of composition No. 10, sodium hypochlorite, activator No. 2, stabilizer No. 3 and sodium hydroxide were used.

As can be seen from Fig. 2, bleaching compositions based on aqueous solutions of sodium hypochlorite with stabilizing additives show almost the same effectiveness. It should be noted that the bleaching effect in all compositions of this series (No. 8–10) is manifested already within the first two minutes of applying the composition to the affected area of wood. The rate of restoration of wood color increases with an increase in the concentration of the activator in the composition and does not depend much on the nature of the stabilizing additives. It is also worth noting that over time, when stored in a solution of agent No. 9, a small precipitate formed.

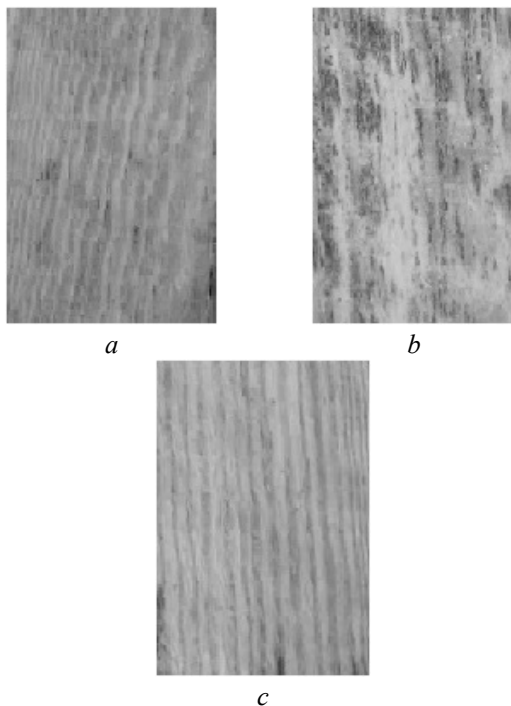


Fig. 2. Samples of affected wood treated with bleaching compounds based on sodium hypochlorite with stabilizers (*a–c* – compositions No. 8–10)

As can be seen from Fig. 2, bleaching compositions based on aqueous solutions of sodium hypochlorite with stabilizing additives show almost the same effectiveness. It should be noted that the bleaching effect in all compositions of this series (No. 8–10) is manifested already within the first two minutes of applying the composition to the affected area of wood. The rate of restoration of wood color increases with an increase in the concentration of the activator in the composition and does not depend much on the nature of the stabilizing additives. It is also worth noting that over time, when stored in a solution of agent No. 9, a small precipitate formed.

Conclusion. Thus, when evaluating compositions for bleaching of oxidative nature for coniferous wood affected by wood-coloring and mold fungi, it was found that aqueous solutions of hydrogen peroxide exhibit a negligible effect with deep lesions of wood. Compositions based on aqueous solutions of sodium hypochlorite with a bleaching activator and stabilizing additives have optimal bleaching properties in the presence of deep sapwood blues. As a result of testing the prepared experimental formulations, the best bleaching properties were shown by formulations No. 8 and 10, which are prepared on the basis of sodium hypochlorite with the addition of activators and stabilizers that enhance the oxidative effect and increase the shelf life of the formulations. When treated with these formulations, a rapid rate of restoration of wood color, deeper bleaching of the affected areas of wood and the absence of sediment formation in the formulations during storage were observed.

Chlorine, being a strong oxidizer, provides antimicrobial action by inhibiting bacterial enzymes, which leads to irreversible oxidation of sulfhydryl groups, which are the main component of these enzymes. Sodium hypochlorite is also a strong base ($\text{pH} > 11$). The high pH of sodium hypochlorite provokes a violation of the integrity of the cytoplasmic membrane through irreversible enzyme inhibition, biosynthetic modification of cellular metabolism and phospholipid degradation during lipid peroxidation. As a result of the chlorination reaction of amino acids, chloramines are formed, which also negatively affect cellular metabolism. Oxidation enhances the effect of irreversible inhibition of enzymatic bacterial activity, replacing the available hydrogen with chlorine. In this connection, the use of sodium hypochlorite in bleaching compounds allows not only to whiten the affected wood, but also gives the composition bactericidal properties.

References

1. Chizhova M. A. Features of coniferous wood finishing. *Vestnik KSAU* [Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University], 2009, no. 7, pp. 157–169 (In Russian).
2. Miloradova L. A., Komarova G. V., Koroleva T. A. *Otbelka cellyulozy* [Bleaching of cellulose]. Arhangelsk, ASTU Publ., 2005. 130 p. (In Russian).

3. Busch M. A., Busch K. W. Bleaches and sterilants. *Encyclopedia of Analytical Science (Second Edition)*, 2005, pp. 284–294. DOI: 10.1016/b0-12-369397-7/00046-7.
4. Korshever N. G. Bleaching of wood. Available at: <https://tech.wikireading.ru/5974> (accessed 20.02.2023) (In Russian).
5. Beck R. H. F., Koch H., Mentech J. Bleach activators. *Carbohydrates as Organic Raw Materials III*, 1996, ch.16, pp. 295–306. DOI: 10.1002/9783527614899.ch16.
6. Nutch V. *Derevoobrabotka* [Woodworking]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2014. 848 p. (In Russian).
7. Echeverria D., Venditti R., Jameel H., Yao Y. A general Life Cycle Assessment framework for sustainable bleaching: A case study of peracetic acid bleaching of wood pulp. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 290. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.125854.
8. Camarero S., Garcia O., Vidal T., Colom J., del Rio J. C., Gutierrez A., Gras J. M., Monje R., Martinez M. J., Martinez A. T. Efficient bleaching of non-wood high-quality paper pulp using laccase-mediator system. *Enzyme and Microbial Technology*, 2004, vol. 35, issues 2–3, pp. 113–120. DOI: 10.1016/j.enzmictec.2003.10.019.
9. Budakçi M., Karamanoğlu M. The restoration of wood material with bleaching. *Proceedings the XXVII International Research for Furniture Industry*, Kastamonu, september 2015, pp. 227–241.
10. Pinca M., Marketti M. Disinfection solution based on sodium hypochlorite and the method of its preparation. Patent EA 007541B1, 2006 (In Russian).
11. Pechnikova I. A. *Sravnitel'naya otsenka toksichnosti i opasnosti simtriazinov v vode na primere proizvodnykh tsianurovoy kisloty i melamina. Avtoreferat dissertatsii kandidata meditsinskikh nauk* [Comparative assessment of toxicity and danger of sim triazines in water on the example of cyanuric acid and melamine derivatives. Abstract of thesis PhD (Medicine)]. Moscow, 2003. 7 p. (In Russian).
12. Merkulov D. A. Hypochlorites and their use in household chemicals. Available at: <https://cosmetic-industry.com/gipohlority-i-ih-primenenie-v-sredstvah-bytovo-himii.html> (accessed 10.02.2023) (In Russian).
13. Aiyou H., Daxing Z. Method of stabilizing sodium hypochlorite solution. Patent CN 1597497A, 2005.
14. Belkin G. I., Movsesov E. E., Sedova L. P., Shchelkonogov A. A., Karavajnyj A. I., Suncov V. S., Belkin N. A., Trubman L. P., Hvorostinskaya L. V., L'vovskaya L. D. Method of obtaining bleach. Patent SU 1534941A1, 1995 (In Russian).
15. Movsesov E. E., Sedova L. P., Karavajnyj A. I., Belosludcev V. S., Shchelkonogov A. A., Belkin G. I., Babkin M. I., Bragin V. A., Shundikov N. A., Grubman L. P., Hvorostinskaya L. V. Method for obtaining bleach based on calcium hypochlorite. Patent SU 1748406A1, 1995 (In Russian).
16. Agostini F., Agostini A., Tridzhante D. Aqueous liquid bleaching compound. Patent RU 2143021C1, 1999 (In Russian).

Список литературы

1. Чижова М. А. Особенности отделки древесины хвойных пород // Вестн. Краснояр. гос. аграр. ун-та. 2009. № 7. С. 157–169.
2. Милорадова Л. А., Комарова Г. В., Королева Т. А. Отбелка целлюлозы. Архангельск: АГТУ, 2005. 130 с.
3. Busch M. A., Busch K. W. Bleaches and sterilants // *Encyclopedia of Analytical Science (Second Edition)*. 2005. P. 284–294. DOI: 10.1016/b0-12-369397-7/00046-7.
4. Коршевер Н. Г. Отбеливание древесины // ВикиЧтение. URL: <https://tech.wikireading.ru/5974> (дата обращения: 20.02.2023).
5. Beck R. H. F., Koch H., Mentech J. Bleach activators // *Carbohydrates as Organic Raw Materials III*. 1996. Ch. 16. P. 295–306. DOI: 10.1002/9783527614899.ch16.
6. Нутча В. *Деревообработка*. М.: Техносфера, 2014. 848 с.
7. A general Life Cycle Assessment framework for sustainable bleaching: A case study of peracetic acid bleaching of wood pulp / D. Echeverria [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 290. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.125854.
8. Efficient bleaching of non-wood high-quality paper pulp using laccase-mediator system / S. Camarero [et al.] // *Enzyme and Microbial Technology*. 2004. Vol. 35, issues 2–3. P. 113–120. DOI: 10.1016/j.enzmictec.2003.10.019.
9. Budakçi M., Karamanoğlu M. The restoration of wood material with bleaching // *Proceedings the XXVII International Research for Furniture Industry*, Kastamonu, September 2015. Kastamonu, 2015, pp. 227–241.
10. Дезинфицирующий раствор на основе гипохлорита натрия и способ его получения: пат. EA 007541B1 / М. Пинца, М. Маркетти. Опубл. 27.10.2006.
11. Печникова И. А. Сравнительная оценка токсичности и опасности симтриазинов в воде на примере производных циануровой кислоты и меламин: автореф. дис. ... канд. мед. наук: 14.02.01. М., 2013. 7 с.

12. Меркулов Д. А. Гипохлориты и их применение в средствах бытовой химии // Бизнес-портал косметической промышленности и индустрии чистоты. URL: <https://cosmetic-industry.com/gipohlority-i-ih-primeneniye-v-sredstvah-bytovoj-himii.html> (дата обращения: 10.02.2023).

13. Method of stabilizing sodium hypochlorite solution: patent CN 1597497A / Н. Aiyou, Z. Daxing. Publ.: 2005.

14. Способ получения отбеливателя: пат. SU 1534941A1 / Г. И. Белкин, Э. Е. Мовсесов, Л. П. Седова, А. А. Щелконогов, А. И. Каравайный, В. С. Сунцов, Н. А. Белкин, Л. П. Трубман, Л. В. Хворостинская, Л. Д. Львовская. Оpubл. 20.10.95.

15. Способ получения отбеливателя на основе гипохлорита кальция: пат. SU 1748406A1 / Э. Е. Мовсесов, Л. П. Седова, А. И. Каравайный, В. С. Белослудцев, А. А. Щелконогов, Г. И. Белкин, М. И. Бабкин, В. А. Брагин, Н. А. Шундииков, Л. П. Грубман, Л. В. Хворостинская. Оpubл. 20.10.95.

16. Водный жидкий отбеливающий состав: пат. RU 2143021C1 / Ф. Агостини, А. Агостини, Д. Триджанте. Оpubл. 20.12.99.

Information about the authors

Bazhelka Ihar – 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

Kanavalava Anastasiya – PhD student, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: anastasiyakonov@gmail.com

Radkevich Luidmila – Researcher, the Rheophysics and Macrokinetics Laboratory. A. V. Luikov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus (15, Brovki str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: l.radkevich.69@gmail.com

Информация об авторах

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

Коновалова Анастасия Александровна – аспирант кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: anastasiyakonov@gmail.com

Радкевич Людмила Вячеславовна – научный сотрудник лаборатории реофизики и макрокинетики. Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15, Республика Беларусь). E-mail: l.radkevich.69@gmail.com

Received 20.03.2023

ОБЩЕИНЖЕНЕРНЫЕ ВОПРОСЫ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

ALL-ENGINEERING QUESTIONS OF TIMBER PROCESSING COMPLEX

УДК 630(476):539.1.04

А. В. Домненкова¹, В. А. Домненков², Г. А. Чернушевич¹
¹Белорусский государственный технологический университет
²Белорусская универсальная товарная биржа

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ЛЕСНОГО ФОНДА ВЕТКОВСКОГО СПЕЦЛЕСХОЗА И ВЫХОДА ЕГО ТЕРРИТОРИИ ИЗ ЗОН РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

В статье приведена динамика изменения площади радиоактивного загрязнения лесного фонда Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь за 1995–2022 гг. Представлен прогноз изменения радиационной обстановки на территории Ветковского спецлесхоза. Поскольку ведение лесного хозяйства в зонах радиоактивного загрязнения регламентируется с учетом плотности загрязнения почв в лесных кварталах, прогноз изменения радиационной обстановки в лесном фонде позволит оптимизировать планирование работ в Ветковском спецлесхозе и, как следствие, расширить возможности эффективного использования лесов. В настоящее время Ветковский спецлесхоз относится к I группе тяжести (катастрофические условия) по радиоактивному загрязнению территории, цезием-137 загрязнено 100% покрытых лесом земель. Загрязнению радионуклидами плотностью свыше 5 Ки/км² на 01.01.2023 г. подвержено 61% территории спецлесхоза, свыше 15 Ки/км² – 23,7%. На территориях с плотностью загрязнения свыше 15 Ки/км² ограничены хозяйственная деятельность и лесопользование, применяются повышенные меры профилактики и предупреждения лесных пожаров, введены ограничения на проведение рубок, заготовку пищевой продукции леса. Согласно прогнозу, к 2050 г. территории лесного фонда спецлесхоза выйдут из зоны 15–40 Ки/км², к 2150 г. в зоне радиоактивного загрязнения останется только 6,8% территории лесного фонда и к 2175 г. Ветковский спецлесхоз полностью выйдет из зон радиоактивного загрязнения.

Ключевые слова: Ветковский спецлесхоз, зоны радиоактивного загрязнения, радионуклиды, цезий-137.

Для цитирования: Домненкова А. В., Домненков В. А., Чернушевич Г. А. Прогнозная оценка лесного фонда Ветковского спецлесхоза и выхода его территории из зон радиоактивного загрязнения // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 224–231. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-26.

A. V. Domnenkova¹, V. A. Domnenkov², G. A. Chernushevich¹
¹Belarusian State Technological University
²Belarusian Universal Commodity Exchange

PREDICTIVE ASSESSMENT OF THE FOREST FUND OF THE VETKOVSKIY FORESTRY AND THE EXIT OF ITS TERRITORY FROM THE ZONES OF RADIOACTIVE CONTAMINATION

The article shows the dynamics of changes in the area of radioactive contamination of the forest fund of the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus for 1995–2022. A forecast of changes in the radiation situation on the territory of the Vetkovskiy forestry is presented. Since forestry in the zones of radioactive contamination is regulated taking into account the density of soil contamination in forest quarters, forecast of changes in the radiation situation in the forest fund will optimize the planning of work in the Vetkovskiy forestry, and as a result, expand the possibilities for the effective use of forests.

As present, the Vetkovskiy forestry belongs to the I group of severity (catastrophic conditions) in terms of radioactive contamination of the territory, 100% of the forested lands are contaminated with cesium-137. As of 01.01.2023, 61% of the territory of the forestry is subject to contamination with radionuclide's with a density of more than 5 Ki/km², 23.7% – more than 15 Ki/km². In areas with a pollution density of more than 15 Ki/km², economic activities and forest management are limited, increased measures are being taken to prevent and prevent forest fires, restrictions on logging and harvesting of forest food products been introduced. According to the forecast, by the 2050 the territories of the will leave the zone of 15–40 Ki/km², by 2150 only 6.8% of the territory of the forest fund will remain in the zone of radioactive contamination and be 2175 the Vetkovskiy forestry will completely leave the zones of radioactive pollution.

Keywords: Vetkovskiy forestry, radioactive contamination zones, radionuclides, cesium-137.

For citation: Domnenkova A. V., Domnenkov V. A., Chernushevich G. A. Predictive assessment of the forest fund of the Vetkovskiy forestry and the exit of its territory from the zones of radioactive contamination. *Proceeding of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 224–231. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-26 (In Russian).

Введение. В результате катастрофы на Чернобыльской АЭС (1986 г.) значительная территория лесного фонда Республики Беларусь подверглась радиоактивному загрязнению. Лесные экосистемы, обладая способностью прочно удерживать радиоактивные изотопы, предотвращая их миграцию за пределы загрязненной территории, являются «барьером» на пути распространения радионуклидов, препятствуют их вторичному перераспределению [1].

В Республике Беларусь территория лесного фонда, отнесенная к зонам радиоактивного загрязнения, составляет (на 1 января 2023 г.) 1502,9 тыс. га, или 15,5% от общей площади. Основная часть загрязненных радионуклидами лесов находится в ведении Министерства лесного хозяйства (далее Минлесхоз) Республики Беларусь (82,0%) и Департамента по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (14,0%) [2–4].

Леса играют важное экологическое, социальное и экономическое значение, поэтому остановка лесохозяйственной деятельности невозможна.

Основными задачами лесохозяйственной деятельности в зонах радиоактивного загрязнения являются:

- усиление экологической роли леса как биохимического барьера, препятствующего выносу радионуклидов за пределы загрязненной территории;
- охрана лесов от пожаров в целях предотвращения их гибели и возможного вторичного радиоактивного загрязнения сопредельных территорий;
- экономически эффективное проведение лесохозяйственных мероприятий и непрерывное использование лесных ресурсов при условии получения нормативно чистой продукции и соблюдения установленного предела годовой дозы облучения [5].

На территории лесного фонда в зонах радиоактивного загрязнения ведение лесного хо-

зяйства осуществляется при условии получения нормативно чистой продукции и соблюдения установленного предела годовой дозы облучения (в 1 мЗв/год), что достигается, в первую очередь, обязательным регламентированием лесохозяйственной и иной деятельности в зонах радиоактивного загрязнения [5–11].

По данным государственного учреждения по защите и мониторингу леса «Беллесозащита» (далее Беллесозащита), площадь радиоактивного загрязнения лесного фонда Минлесхоза составляет (на 1 января 2023 г.) 1226,4 тыс. га (14,2% от общей площади). Наибольшая часть (69,3%) территорий радиоактивного загрязнения лесного фонда отнесена к I зоне с плотностью загрязнения почв цезием-137 от 1 до 5 Ки/км², 23,7% – ко II зоне (5–15 Ки/км²), остальная площадь – к III (15–40 Ки/км²) и IV (40 Ки/км² и более) зонам [2, 4].

За период с 1995 (1747,1 тыс. га) по 2022 г. (1226,4 тыс. га) в результате естественного радиоактивного распада цезия-137 площадь радиоактивного загрязнения лесного фонда Минлесхоза уменьшилась на 520,7 тыс. га, или 29,8% (табл. 1).

Таблица 1

Загрязнение территории лесного фонда ¹³⁷Cs

Наименование объекта исследования	Площадь загрязнения почвы цезием-137, тыс. га						
	1995 г.	2000 г.	2005 г.	2010 г.	2015 г.	2020 г.	2022 г.
Лесной фонд Минлесхоза	1747,1	1641,4	1788,9	1569,4	1392,2	1283,8	1226,4

Цель данного исследования заключается в прогнозе выхода территории лесного фонда государственного специализированного лесохозяйственного учреждения «Ветковский спецлесхоз» из зон радиоактивного загрязнения.

Основная часть. Государственное специализированное лесохозяйственное учреждение «Ветковский спецлесхоз» (далее Ветковский спецлесхоз) Гомельского государственного производственного лесохозяйственного объединения расположено в восточной части Гомельской области на территории Ветковского, Добрушского, Буда-Кошелевского и Чечерского административных районов. Протяженность территории спецлесхоза с севера на юг составляет 57 км, с востока на запад – 45 км.

Ветковский спецлесхоз был создан в 1993 г. Приказом Министерства лесного хозяйства № 19 от 24.04.1993. В состав спецлесхоза входит четыре лесничества: Ветковское, Великонемковское, Светиловичское, Столбунское, которые включают 68 обходов на 20 мастерских участках. Коллектив насчитывает 290 человек, в том числе 104 работника лесной охраны [12].

Особенностью лесного фонда спецлесхоза, влияющей на размеры лесопользования и лесного дохода, является радиоактивное загрязнение.

Основные функциональные обязанности спецлесхоза заключаются в охране и защите леса; лесоразведении на обширных площадях, вышедших из оборота сельхозпользования, с целью закрепления выпавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС радионуклидов и предотвращения их распространения на чистые территории.

В мае 1994 г. при спецлесхозе начал работу пост радиационного контроля, который проводит уточнение плотности загрязнения лесных кварталов, мониторинг уровня содержания радиоактивных элементов в воздухе, анализ особенностей накопления древесной растительностью радионуклидов в зависимости от породы и типа лесорастительных условий местопроизрастания.

Ветковский спецлесхоз относится к I группе тяжести (катастрофические условия) по радиоактивному загрязнению территории – 100% покрытых лесом земель. Загрязнению радионуклидами по плотности свыше 5 Ки/км² на 1 января 2023 г. подвержено 61% территории спецлесхоза, свыше 15 Ки/км² – 23,7% (рисунок).

№ п/п	Название лесничества
1	Великонемковское
2	Светиловичское
3	Столбунское
4	Ветковское

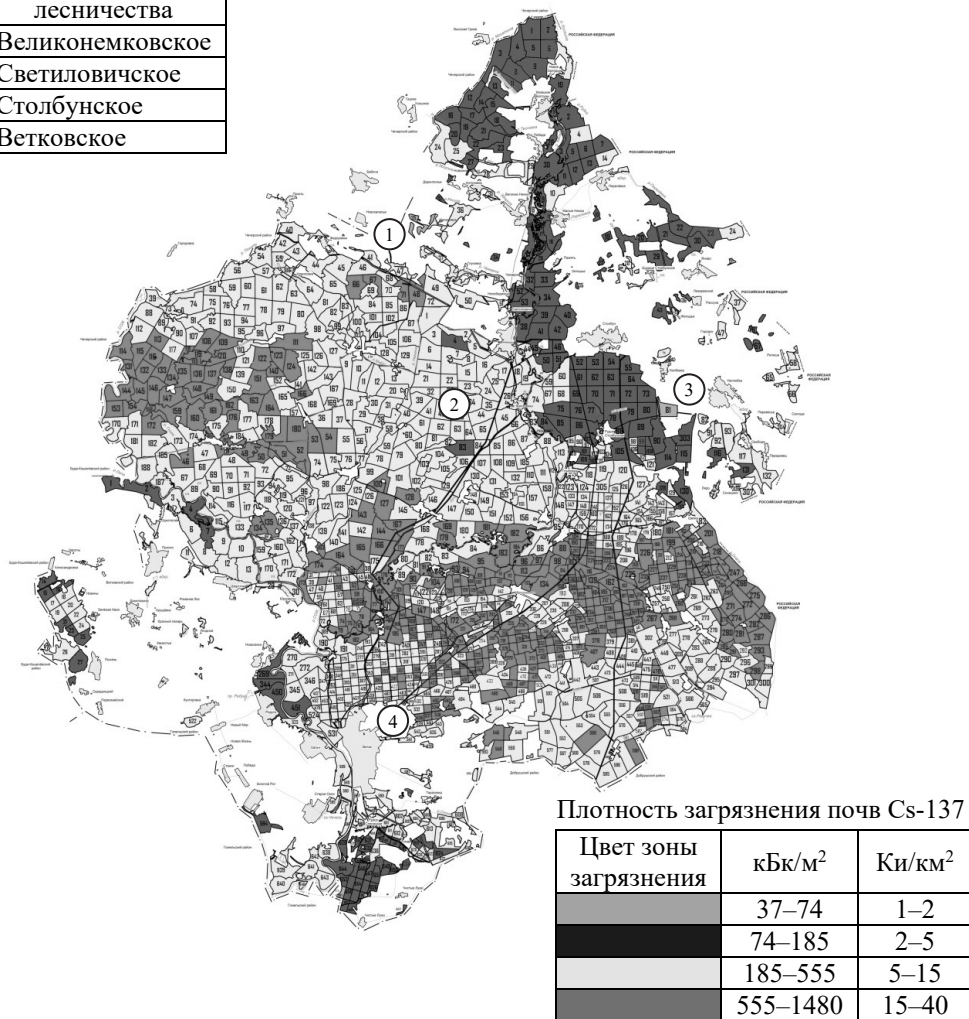


Рис. Загрязнение территории лесного фонда Ветковского спецлесхоза цезием-137 [2]

Для разработки прогноза изменения радиационной обстановки на территории Ветковского спецлесхоза использованы данные Беллесозащиты, полученные учреждением в результате ежегодного обследования радиоактивного загрязнения лесничеств Ветковского спецлесхоза. При расчете не был учтен фактор значительной пространственной неоднородности загрязнения почв цезием-137 в пределах лесничества (каждого лесного квартала).

Основанием для отнесения лесного квартала к той или иной зоне радиоактивного загрязнения является плотность загрязнения, установленная на основании результатов радиационного обследования земель лесного фонда в соответствии с техническим кодексом установившейся практики ТКП 240-2010 (02080) «Радиационный контроль. Обследование земель лесного фонда. Порядок проведения», утвержденным постановлением Министрства лесного хозяйства Республики Беларусь от 22 февраля 2010 г. № 5.10 [7].

Цезий-137 – основной дозаобразующий радионуклид для Республики Беларусь. Радионуклиды – это нестабильные элементы, ядра которых подвергаются распаду. Самопроизвольный радиоактивный распад ядер приводит к непрерывному уменьшению числа ядер атомов радионуклида.

Для определенного радионуклида вероятность распада каждого ядра одинакова в любой момент времени, так как ядра распадаются независимо друг от друга. Закон, выражающий уменьшение количества ядер атомов радиоактивного вещества во времени, называется законом радиоактивного распада, который и лежит в основе прогноза

изменения радиационной обстановки на территории лесного фонда Ветковского спецлесхоза.

Закон радиоактивного распада для любых превращений ядер устанавливает, что за единицу времени распадается всегда одна и та же доля нераспавшихся ядер данного радионуклида. Эту долю называют постоянной распада и обозначают λ [13]. В общем виде этот закон выражается экспоненциальной зависимостью

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t},$$

где N – число ядер, распавшихся за время t (в наших расчетах заданное значение плотности загрязнения почвы); N_0 – начальное число ядер радионуклида (в наших расчетах плотность загрязнения почвы на сегодняшний день); e – основание натурального логарифма; t – время (прогноз), по истечении которого плотность загрязнения почвы уменьшится до заданного значения [13].

Для характеристики устойчивости ядер радионуклида относительно распада используется понятие период полураспада. Период полураспада радионуклида – промежуток времени, в течение которого в результате радиоактивного распада количество ядер данного радионуклида уменьшается в 2 раза. Между постоянной распада (λ) и периодом полураспада ($T_{1/2}$) существует соотношение

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda.$$

Период полураспада ($T_{1/2}$) для цезия-137 составляет 30 лет [13].

Прогноз изменения радиационной обстановки на территории лесного фонда Ветковского спецлесхоза представлен в табл. 2.

Таблица 2

Распределение (прогноз) территории лесного фонда лесничеств Ветковского спецлесхоза по зонам радиоактивного загрязнения

Лесничества Ветковского спецлесхоза	Год	Единицы измерения	Площадь загрязнения почвы цезием-137				
			Всего	в том числе по зонам и подзонам, Ки/км ²			
				1–5	5–15	15–40	40 и более
Великоземковское (24,3 тыс. га)	2014	тыс. га	22,6	2,4	11,1	9,06	0,0
		%	100	10,6	49,1	40,1	0,0
	2022	тыс. га	24,3	3,9	14,3	6,1	0,0
		%	100,0	16,0	58,8	25,1	0,0
	2043	тыс. га	22,5	8,6	13,9	0,0	0,0
		%	92,6	38,2	61,8	0,0	0,0
	2091	тыс. га	18,4	18,4	0,0	0,0	0,0
		%	75,7	100,0	0,0	0,0	0,0
	2163	тыс. га	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ветковское (33 тыс. га)	2014	тыс. га	32,3	1,35	10,2	20,8	0,0
		%	100	4,2	31,6	64,4	0,0
	2022	тыс. га	33,0	3,0	20,1	9,8	0,0
		%	100,0	9,1	60,9	30,0	0,0
	2052	тыс. га	32,1	11,5	20,6	0,0	0,0
		%	97,2	35,8	64,2	0,0	0,0

Продолжение табл. 2

Лесничества Ветковского спецлесхоза	Год	Единицы измерения	Площадь загрязнения почвы цезием-137				
			Всего	в том числе по зонам и подзонам, Ки/км ²			
				1–5	5–15	15–40	40 и более
Ветковское (33 тыс. га)	2100	тыс. га	27,6	27,6	0,0	0,0	0,0
		%	83,6	100,0	0,0	0,0	0,0
	2172	тыс. га	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Светиловичское (23,6 тыс. га)	2014	тыс. га	23,5	0,0	15,98	7,53	0,0
		%	100	0,0	68	32	0,0
	2022	тыс. га	23,6	0,3	19,1	4,1	0,0
		%	100,0	1,3	80,9	17,4	0,0
	2043	тыс. га	23,5	5,2	18,3	0,0	0,0
		%	99,6	22,1	77,9	0,0	0,0
	2091	тыс. га	23,1	23,1	0,0	0,0	0,0
		%	97,9	100,0	0,0	0,0	0,0
	2163	тыс. га	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Столбунское (22 тыс. га)	2014	тыс. га	21,3	5,1	13,3	2,9	0,04
		%	100	23,9	62,4	13,6	0,2
	2022	тыс. га	22,0	8,5	9,1	4,3	0,0
		%	100,0	38,6	41,4	19,5	0,0
	2058	тыс. га	20,5	18,0	2,5	0,0	0,0
		%	93,2	87,8	12,2	0,0	0,0
	2106	тыс. га	7,9	7,9	0,0	0,0	0,0
		%	35,9	100,0	0,0	0,0	0,0
	2178	тыс. га	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Для проверки достоверности прогнозных показателей проведено сравнение расчетных и фактических данных о плотности загрязнения почв в лесных кварталах лесничеств Ветковского спецлесхоза.

Для оценки точности прогноза использован ретроспективный (оценочный) анализ – это анализ данных с учетом изменения во времени, начиная от текущего момента времени к какому-либо прошедшему периоду времени. Для определения входных прогнозных параметров использованы данные радиационного обследования лесных кварталов за 2014 г., рассчитанные на их основе прогнозные данные на 2022 г. и для верификации – фактические данные, полученные в 2022 г.

Абсолютная погрешность измерения – это погрешность средства измерений, выраженная в единицах измеряемой физической величины, характеризующая абсолютное отклонение измеряемой величины от действительного значения физической величины:

$$\Delta X = |X - X_d|,$$

где X – прогнозное значение плотности загрязнения почвы цезием-137 в лесничестве, тыс. га; X_d – фактическое значение плотности загрязнения почвы цезием-137 в лесничестве, тыс. га.

Сравнение прогнозных и фактических значений плотности загрязнения почв цезием-137 (подзона 5–15 Ки/км²) представлено в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение прогнозных и фактических значений плотности загрязнения почв для подзоны 5–15 Ки/км²

Лесничество	Площадь в подзоне 5–15 Ки/км ² , тыс. га			Относительная погрешность измерения, %
	2014 г.	прогноз на 2022 г.	факт на 2022 г.	
Великонемковское	11,1	9,2	14,3	35,6
Ветковское	10,2	8,5	20,1	57,9
Светиловичское	16,0	13,3	19,1	30,5
Столбунское	13,3	11,0	9,1	21,3
Средняя погрешность измерений				36,3

Относительная погрешность измерения – это погрешность измерения, выраженная отношением абсолютной погрешности измерения к действительному значению измеряемой величины:

$$\delta = (\Delta X / X_d) \cdot 100\%.$$

Таблица 4

**Прогноз изменения радиационной обстановки на территории лесного фонда
Ветковского спецлесхоза**

Наименование объекта исследования	Прогноз по годам	Общая площадь лесхоза, тыс. га	Площадь загрязнения почвы цезием-137, тыс. га				
			Всего	в том числе по зонам и подзонам, Ки/км ²			
				1–5	5–15	15–40	40 и более
Ветковский спецлесхоз	2010	99,4	99,4	8,8	45,98	43,77	0,80
	2015	100,1	100,1	9,35	56,02	34,74	0,0
	2020	102,9	102,9	14,88	58,95	29,10	0,0
	2022	103,1	103,1	15,79	62,84	24,45	0,0
	2030	103,1	101,92	22,1	72,7	7,1	0,0
	2050	103,1	101,0	40,7	60,3	0,0	0,0
	2150	103,1	7,0	7,0	0,0	0,0	0,0
	2175	103,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Относительная погрешность измерений варьирует в больших пределах, среднее значение составило 37%.

Ведение лесного хозяйства в зонах радиоактивного загрязнения регламентируется с учетом плотности загрязнения почв в лесных кварталах. Прогноз изменения радиационной обстановки в лесном фонде позволит оптимизировать планирование работ в лесхозах с учетом изменяющейся ситуации, постепенного уменьшения активности радионуклидов и, как следствие, расширения возможности эффективного использования лесов [5].

В настоящее время в Ветковском спецлесхозе территория, загрязненная цезием-137 свыше 15 Ки/км², составляет 23,7% [12]. На этих территориях ограничены хозяйственная деятельность и лесопользование, применяются повышенные меры профилактики и предупреждения лесных пожаров, введены ограничения на проведение рубок, заготовку пищевой продукции леса.

Радиационная обстановка в лесах изменяется крайне медленно, «очищение» загрязненных лесов происходит лишь за счет радиоактивного распада.

При ведении лесного хозяйства в Ветковском спецлесхозе необходимо [5, 6, 14–17]:

- осуществление комплекса мер, направленных на лесовосстановление и лесоразведение, охрану и защиту лесов от пожаров, внедрение мобильных и дистанционных систем для обнаружения очагов возгорания в зонах радиоактивного загрязнения;

- поддержание надлежащего санитарного состояния лесов в зонах отселения, рациональное и эффективное использование лесных ресурсов;

- обеспечение соблюдения норм радиационной безопасности – радиационного контроля на объектах лесного хозяйства и рабочих местах, контроля доз внешнего облучения;

- контроль радиоактивного загрязнения в лесах – уточнение радиационной обстановки, радиационный контроль лесной продукции, радиационный мониторинг;

- совершенствование информирования о радиационной обстановке в лесах работников лесного хозяйства и населения.

Заключение. Планирование лесохозяйственных мероприятий и лесопользования осуществляется в пределах выделенных зон радиоактивного загрязнения.

В табл. 4 представлена динамика изменения радиационной обстановки территории лесного фонда Ветковского спецлесхоза с 2010 по 2175 г.

Как показывает анализ табл. 4 к 2050 г. территории лесного фонда Ветковского спецлесхоза выйдут из зоны 15–40 Ки/км² (на этих территориях в настоящее время ограничены хозяйственная деятельность и лесопользование), к 2150 г. в зоне радиоактивного загрязнения останется только 6,8% территории лесного фонда и к 2175 г. спецлесхоз полностью выйдет из зон радиоактивного загрязнения. Прогноз изменения радиационной обстановки позволит оптимизировать планирование работ в спецлесхозе.

Список литературы

1. Ипатьев В. А., Багинский В. Ф., Булавик И. М. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации. Гомель: Речицкая укрупнен. тип., 1999. 454 с.
2. Радиационный контроль // Гос. учреждение по защите и мониторингу леса «Беллесозащита». URL: <https://bellesozaschita.by/radiacionnyj-kontrol> (дата обращения: 17.02.2023).
3. Карбанович Л. Н. Площадь радиационного загрязнения лесов уменьшилась // Белорус. лесная газ. 2022. 6 янв. С. 2.

4. Распределение территории лесного фонда Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь по зонам радиоактивного загрязнения / А. В. Домненкова [и др.] // Технология органических веществ: материалы 87-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, научн. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 31 янв. – 17 февр. 2023 г. Минск, 2023. С. 60–62.
5. Правила ведения лесного хозяйства на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС. Минск, 2016. 16 с.
6. Критерии оценки радиационного воздействия: ГН 28.12.2012. № 213. Минск: М-во здравоохранения Респ. Беларусь, 2012. 136 с.
7. Радиационный контроль. Обследование земель лесного фонда. Порядок проведения: ТКП 240-2010. Минск: Белстандарт, 2010. 24 с.
8. Радиационный мониторинг лесного фонда. Закладка постоянного пункта наблюдения. Порядок проведения: ТКП 498-2013. Минск: Белстандарт, 2013. 28 с.
9. Радиационный контроль. Объекты лесного хозяйства, рабочие места. Порядок проведения: ТКП 250-2010. Минск: Белстандарт, 2010. 27 с.
10. Радиационный контроль. Отбор и подготовка проб лесной продукции. Порядок проведения: ТКП 251-2010. Минск: Белстандарт, 2010. 24 с.
11. Правила пожарной безопасности в лесах Республики Беларусь: постановление М-ва лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 19 дек. 2016 г., № 70 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. URL: https://pravo.by/upload/docs/op/W21631562p_1486155600.pdf (дата обращения: 18.02.2023).
12. Радиационный контроль // Гос. специализир. лесхоз. учреждение «Ветковский спецлесхоз». URL: <https://ветковский-лесхоз.бел/%D0%B3%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D0%BD%D0%B0%D1%8F> (дата обращения: 18.02.2023).
13. Чернушевич Г. А., Перетрухин В. В. Радиационная безопасность. Лабораторный практикум. Минск: БГТУ, 2018. 198 с.
14. Республиканские допустимые уровни содержания цезия-137 в древесине, продукции из древесины и древесных материалов и прочей пищевой продукции лесного хозяйства: ГН 11.01.2001. № 4. Минск: М-во здравоохранения Респ. Беларусь, 2001. 5 с.
15. Босак В. Н., Сачивко Т. В., Домненкова А. В. Обеспечение радиационной безопасности в лесном хозяйстве Республики Беларусь // Дальневосточная весна – 2018: материалы 16-й Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам экологии и безопасности, Комсомольск-на-Амуре, 27 апр. 2018 г., Комсомольск-на-Амуре, 2018. С. 221–224.
16. Анализ влияния радиоактивного загрязнения «даров леса» на внутреннее облучение населения / Г. А. Чернушевич [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (246). С. 298–305.
17. Асаблівасці арганізацыі харчавання насельніцтва ва ўмовах павышанай радыяцыйнай рызыкі / Р. А. Чарнушэвіч [і інш.] // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 201–207.

References

1. Ipatjev V. A., Baginskiy V. F., Bulavik I. M. *Les. Chelovek. Chernobyl'. Lesnyye ekosistemy posle avarii na Chernobyl'skoy AES: sostoyaniye, prognoz, reaktsiya naseleniya, puti reabilitatsii* [Forest. Person. Chernobyl. Forest ecosystems after the Chernobyl accident: state, forecast, public reaction, ways of rehabilitation]. Gomel', Rechitskaya ukрупnyonnaya tipografiya Publ., 1999. 454 p. (In Russian).
2. Radiation control. URL: <https://bellesozaschita.by/radiacionnyj-kontrol> (accessed 17.02.2023) (In Russian).
3. Karbanovich L. N. The area of radiation pollution of forests has decreased. *Belorusskaya lesnaya gazeta* [Belarus forest newspaper], 2022, January 6, p. 2 (In Russian).
4. Domnenkova A. V., Chernushevich G. A., Ermak I. T., Bosak V. N. Distribution of the territory of the forest fund of the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus by zones of radioactive contamination. *Technologiya organicheskikh veshchestv: materialy 87-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sortudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Technology of organic substances: materials of the 87th scientific and technical conference of faculty, researchers and graduate students (with international participation)]. Minsk, 2023, pp. 60–62 (In Russian).
5. *Pravila vedeniya lesnogo khozyaystva na territoriyakh, podverghshikhsya radioaktivnomu zagryazneniyu v rezul'tate katastrofy na Chernobyl'skoy AES* [Forest management rules in the areas affected by radioactive contamination as a result of the Chernobyl accident]. Minsk, 2016. 16 p. (In Russian).
6. GN 28.12.2012. Criteria for assessing radiation exposure. No. 213. Minsk, Ministry of Health of the Republic of Belarus Publ., 2012. 136 p. (In Russian).
7. ТКП 240-2010. Radiation control. Examination of forest lands. Procedure. Minsk, Belstandart Publ., 2010. 24 p. (In Russian).

8. ТКР 498-2013. Radiation monitoring of forest fund. Laying of permanent point of observation. Procedure. Minsk, Belstandart Publ., 2013. 28 p. (In Russian).
9. ТКР 250-2010. Radiation control. Forestry objects, workplaces. Procedure. Minsk, Belstandart Publ., 2010. 27 p. (In Russian).
10. ТКР 251-2010. Radiation control. Selection and preparation of samples of forest products. Procedure. Minsk, Belstandart Publ., 2010. 24 p. (In Russian).
11. Fire safety rules in the forests of the Republic of Belarus: decree of the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus, 19.12.2016, no. 70. Available at: https://pravo.by/upload/docs/op/W21631562p_1486155600.pdf (accessed 18.02.2023) (In Russian).
12. Radiation control. Available at: <https://ветковский-лесхоз.бел%D0%B3%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D0%BD%D0%B0%D1%8F> (accessed 18.02.2023) (In Russian).
13. Chernushevich G. A., Peretrukhin V. V. *Radiatsionnaya bezopasnost'. Laboratornyy praktikum* [Radiation safety. Laboratory workshop]. Minsk, BSTU Publ., 2018. 198 p. (In Russian).
14. GN 11.01.2001. Republican permissible limits of cesium-137 content in the wood, wood products and wood-based materials and other non-food forest products. No. 4. Minsk, Ministry of Health of the Republic of Belarus Publ., 2001. 5 p. (In Russian).
15. Bosak V. N., Sachivko T. V., Domnenkova A. V. Ensuring radiation safety in the forestry of the Republic of Belarus. *Dal'nevostochnaya vesna – 2018: materialy 16-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po problemam ekologii i bezopasnosti* [Far Eastern Spring – 2018: materials of the 16th International scientific and technical Conference on the problems ecology and safety]. Komsomolsk-on-Amur, 2018, pp. 221–224 (In Russian).
16. Chernushevich G. A., Azovskaya N. O., Domnenkova A. V., Kiselev S. V. Impact analysis of the radioactive contamination of non-timber forest resources on the internal radiation of local people. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2021, no. 2 (246), pp. 298–305 (In Russian).
17. Chernushevich G. A., Domnenkova A. V., Kiselev S. V., Azovskaya N. O. Problems of food supply for population under increased radiation risks. *Trudy BGTU* [Proceeding of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2023, no. 1 (264), pp. 201–207 (In Belarussian).

Информация об авторах

Домненкова Алеся Владимировна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: domnenkova@belstu.by

Домненков Виталий Александрович – маклер управления торгов лесопродукцией. Белорусская универсальная товарная биржа (220099, г. Минск, ул. Казинца, 2, Республика Беларусь). E-mail: domnenkova@belstu.by

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

Domnenkova Alesia Vladimirovna – PhD (Agriculture), Assistant Professor, the Department of Occupational Safety. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: domnenkova@belstu.by

Domnenkov Vitaliy Aleksandrovich – stockbroker of forest products trading management. Belarusian Universal Commodity Exchange (2, Kazintca str., 220099, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: domnenkova@belstu.by

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 20.03.2023

УДК 674.023

Б. В. Войтеховский, С. А. Гриневич, А. Ф. Аникеенко
Белорусский государственный технологический университет

ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ КРОМОК ЛАМИНИРОВАННЫХ ДРЕВЕСНОСТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ НАКЛОННЫМИ РЕЖУЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

В настоящее время энерго- и ресурсосбережение является одной из наиболее актуальных задач для производства. Одним из направлений решения данной задачи может быть установление рациональных режимов механической обработки древесины и древесных материалов, обеспечивающих требуемое качество обработки при минимальных энергетических затратах.

В мебельной промышленности широкое применение находят ламинированные древесностружечные плиты. Фрезерование кромок этого материала является довольно энергоемким процессом, и снижение энергетических затрат представляет собой важную задачу как с научной, так и с практической точки зрения. Одним из способов снижения энергопотребления и повышения качества обработки является создание угла наклона режущих элементов.

В представленной статье приводятся данные экспериментальных исследований по изучению влияния технологических режимов на энергоемкость процесса фрезерования ламинированных древесностружечных плит. В отличие от потребляемой мощности удельная работа резания является более объективной характеристикой энергоемкости процесса и представляет собой работу, затрачиваемую на снятие единицы объема стружки. Отличительной особенностью данного исследования является то, что рассмотрены не только общепринятые технологические факторы, влияющие на энергоемкость процесса фрезерования, такие как угол резания, скорость резания, высота снимаемого слоя, толщина стружки, но и угол наклона режущей кромки ножей. Построены графические зависимости, позволяющие наглядно оценить влияние каждого технологического фактора на энергоемкость процесса фрезерования. Установлено, что создание угла наклона режущей кромки в диапазоне от 0 до 30° позволяет снизить энергоемкость процесса до 54%.

Ключевые слова: энергоемкость, фрезерование, скорость резания, ламинированная древесностружечная плита, мощность.

Для цитирования: Войтеховский Б. В., Гриневич С. А., Аникеенко А. Ф. Энергоемкость процесса фрезерования кромок ламинированных древесностружечных плит наклонными режущими элементами // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 232–237. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-27.

B. V. Voitekhovsky, S. A. Grinevich, A. F. Anikeenko
Belarusian State Technological University

ENERGY INTENSITY OF THE LAMINATED CHIPBOARD EDGES MILLING PROCESS WITH INCLINED CUTTING ELEMENTS

Currently, energy and resource conservation is one of the most urgent tasks for production. One of the ways to solve this problem is the establishment of rational modes of wood and wood materials mechanical processing, ensuring the required quality of processing with minimal energy costs.

Laminated chipboards are widely used in the furniture industry. Milling the edges of this material is a rather energy-intensive process and reducing energy costs is an important task both from a scientific and practical point of view. One of the ways to reduce energy consumption and improve the processing quality is to create an inclination angle of cutting elements.

The article presents the experimental studies data of the technological modes influence on the energy intensity of the laminated chipboard milling process. In contrast to the power consumption, the specific cutting work is the more objective characteristic of the process energy intensity and represents the work consumption on removing a unit of chip volume. A distinctive feature of this study is consider not only the generally accepted technological factors affecting the energy intensity of the milling process, such as the cutting angle, cutting speed, height of the removed layer, chip thickness, but also the inclination angle of the knives cutting edge. Graphical dependencies that allow visual assess the impact of each technological factor on the energy intensity of the milling process are constructed. It is established that the creation of the inclination angle of the cutting edge in the range from 0 to 30 reduces the energy intensity of the process by up to 54%.

Keywords: energy intensity, milling, cutting speed, laminated chipboard, power.

For citation: Voitechovsky B. V., Grinevich S. A., Anikeenko A. F. Energy intensity of the laminated chipboard edges milling process with inclined cutting elements. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 232–237. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-27 (In Russian).

Введение. В мебельной промышленности широкое распространение нашли ламинированные древесностружечные плиты (ЛДСТП). Обработка кромок заготовок из данного вида древесного материала методом фрезерования обеспечивает высокое качество получаемой продукции. Древесностружечные плиты обладают повышенными абразивными свойствами, поэтому в качестве режущего инструмента применяют резцы, изготовленные из материалов, обладающих повышенной износостойкостью (твердые сплавы, алмазы и др.).

Фрезерование кромок ЛДСТП является довольно энергоемким процессом. В качестве одного из способов снижения потребляемой мощности и повышения качества обработки используют создание угла наклона режущих элементов. Эффективность этого приема для натуральной древесины экспериментально доказана в работах В. Д. Лескива [1] и А. М. Векшина [2]. Однако эти результаты не могут быть применены к ламинированным древесностружечным плитам в силу специфических физико-механических свойств данного древесного материала. В то же время установлено, что создание угла наклона при фрезеровании ламинированных древесностружечных плит позволяет повысить стойкость режущего инструмента [3–5].

Целью данного исследования является определение влияния основных технологических факторов (угла наклона режущей кромки ω , угла резания δ , скорости резания V , толщины снимаемого слоя h , толщины стружки a) на энергоемкость процесса фрезерования ламинированных древесностружечных плит.

Основная часть. В работах [6, 7] приведены результаты выполненных исследований по определению влияния основных переменных технологических факторов на мощность, затрачиваемую при цилиндрическом фрезеровании кромок ламинированных древесностружечных плит. Однако мощность процесса не в полной мере характеризует его энергозатратность. Мощность, по определению, это работа, отнесенная к единице времени. Другой важной величиной, широко применяемой в теории резания древесины и древесных материалов, является удельная работа резания K [8–11].

$$K = \frac{A}{V_{\text{ст}}}, \quad (1)$$

где A – затраченная работа, Дж; $V_{\text{ст}}$ – объем снятого слоя, см^3 .

Таким образом, удельная работа – это работа, затрачиваемая на снятие 1 см^3 объема стружки. Также удельная работа резания может быть выражена через мощность:

$$K = \frac{60 \cdot N_0}{b \cdot h \cdot v_s}, \quad (2)$$

где N_0 – потребляемая мощность при остром резце, Вт; b – ширина обрабатываемой заготовки, мм; h – величина снимаемого припуска, мм; v_s – скорость подачи, м/мин.

$$v_s = \frac{S_z \cdot z \cdot n}{1000}, \quad (3)$$

где S_z – подача на резец, мм; z – число режущих элементов, шт.; n – частота вращения режущего инструмента, мин^{-1} .

$$S_z = \frac{a}{\sqrt{\frac{h}{D}}}, \quad (4)$$

где a – средняя толщина стружки, мм; D – диаметр фрезы, мм.

$$n = \frac{60 \cdot 1000 \cdot v}{\pi \cdot D}, \quad (5)$$

где v – скорость резания, м/с.

Подставив значения из формул (3)–(5) в формулу (2) и преобразовав, получим

$$K = \frac{N_0 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{D}{h}}}{b \cdot a \cdot z \cdot v}. \quad (6)$$

Формулу (6) и будем использовать для расчета удельной работы резания.

При проведении опытов применен метод планирования эксперимента и выбран план В₅. Для проведения эксперимента была специально разработана конструкция сборной цилиндрической фрезы с изменяемыми углами наклона режущей кромки и углами резания [12]. Условия выполнения исследований аналогичны приведенным в работе [5]. Основными переменными технологическими факторами приняты: угол наклона резца в плане ω , угол резания δ , скорость резания v , толщина срезаемого слоя (припуск) h , средняя толщина стружки a .

В результате статистической обработки данных получено уравнение регрессии для начальной мощности:

$$\begin{aligned} N_0 = & -598,98 - 5,51 \cdot \omega - 9,63 \cdot \delta + 59,75 \cdot v + \\ & + 64,84 \cdot h + 178,56 \cdot a - 1,19 \cdot v^2 - 6682,75 \times \\ & \times a^2 + 0,42 \cdot \delta \cdot v + 41,73 \cdot \delta \cdot a + 41,6 \cdot v \cdot a. \quad (7) \end{aligned}$$

Адекватность полученной математической модели подтверждена проверкой по F-критерию Фишера [13, 14].

Для того чтобы проанализировать влияние выбранных переменных технологических факторов на энергоемкость процесса фрезерования, по полученному уравнению построены графические зависимости на верхнем, среднем и нижнем уровнях варьирования.

На рис. 1 представлена зависимость удельной работы резания от угла наклона ножа фрезы в плане.

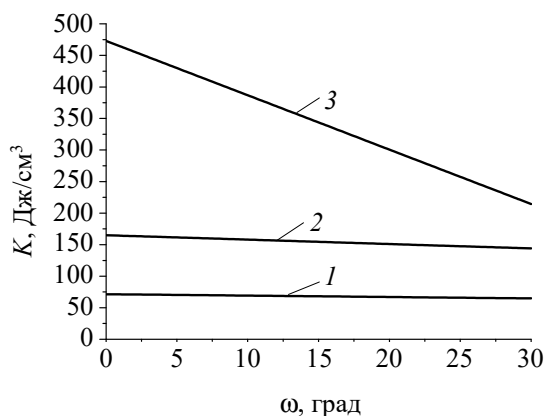


Рис. 1. Влияние угла наклона режущей кромки ω на удельную работу резания:

- 1 – $a = 0,45$ мм; $h = 4,5$ мм; $v = 50$ м/с; $\delta = 80^\circ$;
 2 – $a = 0,25$ мм; $h = 3,0$ мм; $v = 35$ м/с; $\delta = 70^\circ$;
 3 – $a = 0,05$ мм; $h = 1,5$ мм; $v = 20$ м/с; $\delta = 60^\circ$

Из представленной зависимости следует, что с увеличением угла в плане удельная работа резания падает. Уменьшение потребляемой мощности связано с плавностью входа режущего элемента в обрабатываемый материал и эффектом кинематического заострения ножа.

Зависимость удельной работы резания от угла резания представлена на рис. 2.

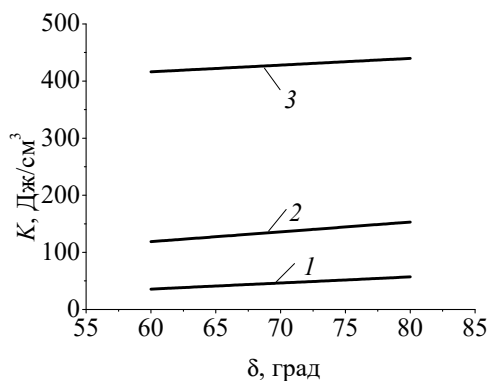


Рис. 2. Влияние угла резания δ на удельную работу резания:

- 1 – $a = 0,45$ мм; $h = 4,5$ мм; $v = 50$ м/с; $\omega = 30^\circ$;
 2 – $a = 0,25$ мм; $h = 3,0$ мм; $v = 35$ м/с; $\omega = 15^\circ$;
 3 – $a = 0,05$ мм; $h = 1,5$ мм; $v = 20$ м/с; $\omega = 0^\circ$

Здесь прослеживается линейный рост начальной мощности при увеличении угла резания. Данный эффект может быть объяснен ухудшением условий схода стружки и увеличением давления на переднюю поверхность ножа.

На рис. 3 представлен график, иллюстрирующий зависимость удельной работы резания от скорости резания.

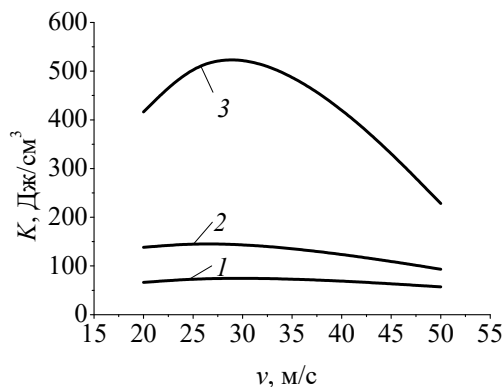


Рис. 3. Влияние скорости резания на удельную работу резания:

- 1 – $a = 0,45$ мм; $h = 4,5$ мм; $\omega = 30^\circ$; $\delta = 80^\circ$;
 2 – $a = 0,25$ мм; $h = 3,0$ мм; $\omega = 15^\circ$; $\delta = 70^\circ$;
 3 – $a = 0,05$ мм; $h = 1,5$ мм; $\omega = 0^\circ$; $\delta = 60^\circ$

С увеличением скорости резания удельная работа резания изменяется по сложной криволинейной зависимости, близкой к параболической. Особенно ярко выражена кривизна графика для нижнего уровня варьирования переменных факторов. Здесь удельная работа резания повышается с увеличением скорости от 20 до 30 м/с, но дальнейшее увеличение скорости резания до 50 м/с приводит к ее падению. Как указывает В. И. Любченко [15], скорость резания влияет на выходные показатели процесса резания через противоречиво действующие факторы. В частности, увеличение скорости резания, с одной стороны, приводит к росту энергозатрат на преодоление сил инерции от разгона срезаемой стружки, но с другой стороны это может вызвать снижение коэффициента трения. На нулевом и верхнем уровнях варьирования переменных факторов это влияние не столь значительно.

Графические зависимости на рис. 4 отражают влияние величины снимаемого припуска на удельную работу резания.

Во всех случаях с ростом величины припуска наблюдается падение удельной работы резания за исключением кривой, построенной на нижнем уровне варьирования переменных факторов, где в диапазоне h от 3,8 до 4,5 мм наблюдается незначительный рост. Такое поведение зависимостей связано с противоречивым влиянием величины припуска на удельную работу резания. Если обратиться к формуле (2), то рост величины

снимаемого припуска должен приводить к падению K , но при этом на всех уровнях варьирования увеличение h вызывает рост затрачиваемой мощности и, соответственно, удельной работы резания.

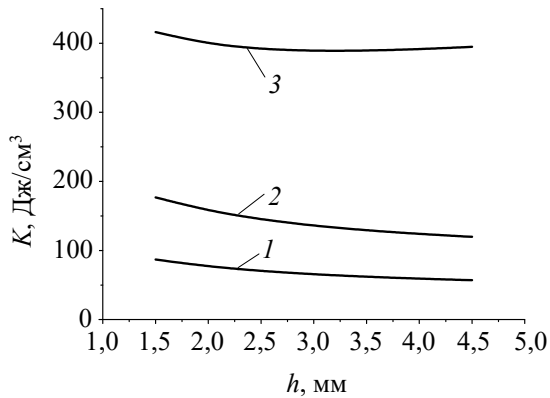


Рис. 4. Влияние высоты снимаемого слоя на удельную работу резания:
 1 – $a = 0,45$ мм; $v = 50$ м/с; $\omega = 30^\circ$; $\delta = 80^\circ$;
 2 – $a = 0,25$ мм; $v = 35$ м/с; $\omega = 15^\circ$; $\delta = 70^\circ$;
 3 – $a = 0,05$ мм; $v = 20$ м/с; $\omega = 0^\circ$; $\delta = 60^\circ$

Графики зависимости удельной работы резания от толщины стружки представлены на рис. 5.

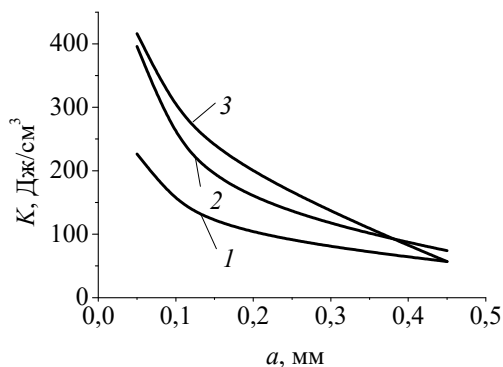


Рис. 5. Влияние толщины стружки на удельную работу резания:
 1 – $\delta = 80^\circ$; $h = 4,5$ мм; $v = 50$ м/с; $\omega = 30^\circ$;
 2 – $\delta = 70^\circ$; $h = 3,0$ мм; $v = 35$ м/с; $\omega = 15^\circ$;
 3 – $\delta = 60^\circ$; $h = 1,5$ мм; $v = 20$ м/с; $\omega = 0^\circ$

Как следует из зависимостей, рост толщины стружки во всех случаях приводит к снижению энергоемкости процесса фрезерования ламинированных древесностружечных плит. Это вполне закономерное явление, наблюдающееся также и для натуральной древесины. Чем больше толщина снимаемой стружки, тем меньше проходов требуется лезвию, чтобы срезать единицу объема материала.

И наоборот, чем меньше толщина стружки, тем, конечно, меньше и нагрузка на переднюю поверхность режущего элемента, но потребуются значительно большее количество резов, чтобы снять единицу припуска.

Заключение. На основании полученной зависимости влияния переменных технологических факторов на удельную работу резания при фрезеровании кромок ЛДСтП сделаны следующие выводы.

1. Установлено, что наклон режущих элементов фрезы в плане при обработке ламинированных ДСтП приводит к снижению энергоемкости процесса на нижнем уровне варьирования в 2,20 раза, на верхнем – в 1,10 раза.

2. Рост угла резания вызывает увеличение удельной работы резания в 1,05 раза на нижнем уровне варьирования, в 1,62 раза – на верхнем.

3. Скорость резания неоднозначно влияет на энергоемкость процесса. Особенно это проявляется на нижнем уровне переменных факторов, где от 20 до 30 м/с наблюдается рост удельной работы резания в 1,27 раза, а затем при дальнейшем увеличении скорости – падение в 2,32 раза.

4. При увеличении припуска с 1,5 до 4,5 мм на верхнем и нулевом уровнях варьирования переменных факторов наблюдается падение удельной работы резания в 1,05–1,47 раза соответственно, и только на нижнем уровне при росте припуска от 3,8 до 4,5 мм наблюдается незначительный рост.

5. Увеличение толщины стружки от 0,05 до 0,45 мм на всех уровнях варьирования вызывает резкое падение энергоемкости процесса фрезерования. В результате на нижнем уровне варьирования значение энергоемкости уменьшается в 7,42 раза, на верхнем – в 3,96 раза.

Список литературы

1. Лискив В. Д. Исследование зависимостей силовых и качественных показателей процесса цилиндрического фрезерования древесины от положения лезвия относительно направления резания: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Львов, 1973. 24 с.
2. Векшин А. М. Исследование процесса цилиндрического фрезерования древесины тонкими винтовыми ножами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1970. 31 с.
3. Войтеховский Б. В., Гриневич С. А., Лукаш В. Т. Исследование стойкости фрезерного инструмента с наклонными резаками при обработке кромок ДСтП // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревооб. пром-сть. 2007. Вып. XV. С. 225–229.
4. Гришкевич А. А., Аникеенко А. Ф., Гаранин В. Н. Особенности фрезерного сборного инструмента с изменяемыми углами: передним и наклона режущей кромки // Труды БГТУ. 2014. № 2: Лесная и деревооб. пром-сть. С. 175–177.

5. Войтеховский Б. В., Гриневич С. А. Особенности износа твердосплавного инструмента при фрезеровании ламинированных ДСтП наклонными ножами // Труды БГТУ. 2011. № 2: Лесная и деревообработ. пром-сть. С. 252–255.

6. Гриневич С. А., Войтеховский Б. В. Исследование технологической стойкости при фрезеровании ламинированных древесностружечных плит наклонными резцами // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообработ. пром-сть. 2010. Вып. XVIII. С. 284–286.

7. Аникеенко А. Ф., Фридрих А. П. Рекомендации по методике проведения исследований в области механической обработки ламинированных древесностружечных плит // Труды БГТУ. 2011. № 2: Лесная и деревообработ. пром-сть. С. 313–317.

8. Любченко В. Н. Резание древесины и древесных материалов: учеб. пособие. М.: Лесная пром-сть, 1986. 296 с.

9. Бершадский А. Л., Цветкова Н. И. Резание древесины: учеб. пособие. Минск: Выш. шк., 1975. 304 с.

10. Гришкевич А. А., Гаранин В. Н. Механическая обработка древесины и древесных материалов, управление процессами резания. Лабораторный практикум: учеб.-метод. пособие. Минск: БГТУ, 2014. 90 с.

11. Зотов Г. И. Энергоемкость резания // Дерево.RU. 2008. № 1. С. 132–134.

12. Войтеховский Б. В., Гриневич С. А. Влияние технологических факторов на качество обработанной поверхности при фрезеровании ламинированных ДСтП // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообработ. пром-сть. 2008. Вып. XVI. С. 323–327.

13. Пижурин А. А., Пижурин А. А. Моделирование и оптимизация процессов деревообработки. М.: Моск. гос. ун-т леса, 2004. 376 с.

14. Пижурин А. А., Розенблит М. С. Исследования процессов деревообработки. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 232 с.

15. Любченко В. И. Резание древесины и древесных материалов: учеб. пособие для ВУЗов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Моск. гос. ун-т леса, 2002. 309 с.

References

1. Liskiv V. D. *Issledovaniye zavisimostey silovykh i kachestvennykh pokazateley protsesssa tsilindricheskogo frezerovaniya drevesiny ot polozheniya lezviya odnositel'no napravleniya rezaniya* [Investigation of the dependence of power and quality indicators of the process of cylindrical wood milling on the position of the blade relative to the cutting direction. Abstracts of thesis PhD (Engineering)]. Lvov, 1973. 24 p. (In Russian).

2. Vekshin A. M. *Issledovaniye protsesssa tsilindricheskogo frezerovaniya drevesiny tonkimi vintovymi nozhami* [Investigation of the process of cylindrical wood milling with thin screw knives. Abstracts of thesis PhD (Engineering)]. Moscow, 1970. 31 p. (In Russian).

3. Voitekhevsky B. V., Grinevich S. A., Lukash V. T. Study of the durability of milling tools with inclined cutters when processing chipboard edges. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2007, issue XV, pp. 225–229 (In Russian).

4. Grishkevich A. A., Anikeenko A. F., Garanin V. N. Features of the milling combined tool with changeable corners: to lobbies and an inclination of the cutting edge. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 175–177 (In Russian).

5. Voitekhevsky B. V., Grinevich S. A. Features of wear of hard-alloy tools during milling of laminated chipboard with inclined knives. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2011, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 252–255 (In Russian).

6. Grinevich S. A., Voitekhevsky B. V. Investigation of technological stability during milling of laminated chipboards with inclined cutters. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2010, issue XVIII, pp. 284–286 (In Russian).

7. Anikeenko A. F., Friedrich A. P. Recommendations on the methodology for conducting research in the field of mechanical processing of laminated chipboards. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2011, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 313–317 (In Russian).

8. Lyubchenko V. N. *Rezaniye drevesiny i drevesnykh materialov* [Wood cutting and wood materials]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1986. 296 p. (In Russian).

9. Bershadskiy A. L., Tsvetkova N. I. *Rezaniye drevesiny* [Wood cutting]. Minsk, Vysheyschaya shkola Publ., 1975. 304 p. (In Russian).

10. Grishkevich A. A., Garanin V. N. *Mekhanicheskaya obrabotka drevesiny i drevesnykh materialov, upravleniye protsessami rezaniya. Laboratornyy praktikum* [Mechanical processing of wood and wood materials, cutting process control. Laboratory workshop]. Minsk, BGTU Publ., 2014. 90 p. (In Russian).

11. Zotov G. I. Energy intensity of cutting. *Derevo.RU* [Wood.RU], 2008, no. 1, pp. 132–134 (In Russian).

12. Voitekhovskiy B. V., Grinevich S. A. Influence of technological factors on the quality of the machined surface during milling of laminated chipboard. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2008, issue XVI, pp. 323–327 (In Russian).

13. Pizhurin A. A., Pizhurin A. A. *Modelirovaniye i optimizatsiya protsessov derevoobrabotki* [Modeling and optimization of woodworking processes]. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 2004. 376 p. (In Russian).

14. Pizhurin A. A., Rozenblit M. S. *Issledovaniya protsessov derevoobrabotki* [Research of woodworking processes]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 232 p. (In Russian).

15. Lyubchenko V. I. *Rezaniye drevesiny i drevesnykh materialov* [Cutting wood and wood materials]. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 2002. 309 p. (In Russian).

Информация об авторах

Войтеховский Борис Викторович – старший преподаватель кафедры инженерной графики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: voitechovskiy@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

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

Voitekhovskiy Boris Viktorovich – Senior Lecturer, the Department of Engineering Graphics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: voitechovskiy@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

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 15.03.2023

УДК 621.785.531

М. Н. Пищов, С. Е. Бельский, Ф. Ф. Царук
Белорусский государственный технологический университет
**ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ
УСТАЛОСТНЫХ ИЗЛОМОВ**

В статье исследована возможность использования высокочастотного циклического нагружения для проведения усталостных испытаний алюминиевого сплава АК8МЗ, полученного с использованием вторичного алюминиевого сырья. Приведены схемы стендов для проведения испытаний и методика определения усталостных характеристик металлических материалов. Установлено совпадение распределения усталостных трещин с максимумом величины циклических напряжений. Показано, что использование высокочастотного нагружения позволяет проводить сравнительные испытания конструкционных материалов с существенным ускорением процесса исследования и с повышенной достоверностью результатов за счет большего количества испытанных объектов при приемлемом уровне трудозатрат и экономии энергоресурсов.

Экспериментально установлена оптимальная величина процентного содержания железа в исследуемом сплаве АК8МЗ с точки зрения уровня его усталостных свойств, которую можно принять в пределах 1%, с допустимой величиной отклонения не более 0,5% Fe. Можно предположить, что данное влияние примеси железа сохранится и для различных видов обработки поверхности такого сплава. Проведение фрактографического анализа изломов образцов заключалось в определении и последующем установлении основных причин разрушения материала. Как правило, визуальное изучение поверхности изломов позволило установить место начала разрушения и характер его дальнейшего протекания.

Выявлено, что использованные в данной работе параметры лазерной технологии упрочнения не могут быть рекомендованы для повышения уровня усталостных характеристик исследованного сплава.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, усталостные характеристики, усталостные испытания, лазерная обработка, усталостные трещины, излом, структура.

Для цитирования: Пищов М. Н., Бельский С. Е., Царук Ф. Ф. Фрактографический анализ высокочастотных усталостных изломов // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 238–244. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-28.

M. N. Pishchov, S. E. Belsky, F. F. Tsaruk
Belarusian State Technological University
**FRACTOGRAPHIC ANALYSIS OF HIGH-FREQUENCY
FATIGUE FRACTURES**

The article explores the possibility of using high-frequency cyclic loading for fatigue testing of aluminum alloy AK8M3 obtained using recycled materials. Schemes of stands for testing and a method for determining the fatigue characteristics of metallic materials are given. The coincidence of the distribution of fatigue cracks with the maximum value of cyclic stresses is established. It is shown that the use of high-frequency loading makes it possible to carry out comparative tests of structural materials with a significant acceleration of the research process and with increased reliability of the results due to a larger number of tested objects at an acceptable level of labor costs and energy savings.

The optimal value of the percentage of iron in the AK8M3 alloy under study was experimentally established in terms of the level of its fatigue properties, which can be taken within one percent, with an allowable deviation of not more than half a percent of Fe. It can be assumed that this effect of the iron impurity will remain for various types of surface treatment of this alloy. The fractographic analysis of the fractures of the samples consisted in determining and subsequently establishing the main causes of the destruction of the material. Thus, it has been established that the parameters of the laser hardening technology used in this work cannot be recommended for increasing the level of fatigue characteristics of the studied alloy.

Keywords: aluminum alloys, fatigue characteristics, fatigue tests, laser processing, fatigue cracks, fracture, structure.

For citation: Pishchov M. N., Belsky S. E., Tsaruk F. F. Fractographic analysis of high-frequency fatigue fractures. *Processing of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 238–244. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-28 (In Russian).

Введение. В настоящее время сплавы на основе алюминия благодаря наличию хороших служебных свойств по объему производства занимают в мире второе место после сплавов на основе железа. При этом следует отметить, что получение тонны первичного алюминия требует на порядок выше энергозатрат по сравнению с получением тонны сплава на основе железа. Поэтому весьма актуальной (особенно при значительном подорожании энергоносителей в сезоне 2021/2022 г.) является задача всемерного увеличения использования вторичного алюминия, получение которого позволяет снизить энергозатраты до 20 раз по сравнению с первичным при существенно меньшей экологической нагрузке на среду обитания. Известно, что в Европейском Союзе производство вторичных алюминиевых сплавов до последнего времени росло быстрее, чем производство первичных, причем переработкой вторичного сырья занимались порядка двухсот заводов [1].

Однако по комплексу механических свойств алюминиевые сплавы, полученные с использованием металлолома, существенно уступают первичным, что связано с большим количеством вредных примесей, прежде всего железа. Наличие в структуре такого материала крупноиглочатых включений Fe_3Al существенно ухудшает усталостные характеристики сплавов.

Для расширения номенклатуры деталей машин, изготавливаемых из таких материалов, целесообразно использовать поверхностное упрочнение, в частности, лазерную обработку. В этом случае существенно повышается твердость материала, а также его сопротивление изнашиванию. Однако влияние лазерной обработки на усталостные характеристики алюминиевых сплавов почти не исследовано.

Для снижения трудоемкости и сокращения времени проведения усталостных испытаний, особенно при больших (до 10^8 циклов) базах, весьма перспективным является использование высоких частот механических колебаний, позволяющих за приемлемый промежуток времени обеспечить наработку значительного числа циклов.

Так, для проведения испытаний на частоте 50 Гц и базе 10^8 циклов необходимо затратить 555 ч непрерывной работы (более 23 сут) испытательной установки, а проведение этих же испытаний на частоте 20 кГц – всего 1,3 ч, т. е. в 400 раз меньше времени. Особенно эффективным является использование данного метода исследований при проведении сравнительных испытаний [2–7].

Основная часть. Объектом исследований в данной работе являлись плоские балочные образцы толщиной 2,0 мм из вторичного алюминиевого сплава АК8МЗ с различным содержанием железа и разным состоянием поверхности (таблица). Общий вид образца без лазерного воздействия с усталостным разрушением и лазерным воздействием без усталостной трещины приведены на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид образцов для усталостных испытаний

Нагружение образцов (рис. 2) производилось на специально разработанной исследовательской установке с резонансной частотой колебаний $f_{рез} = 18$ кГц.

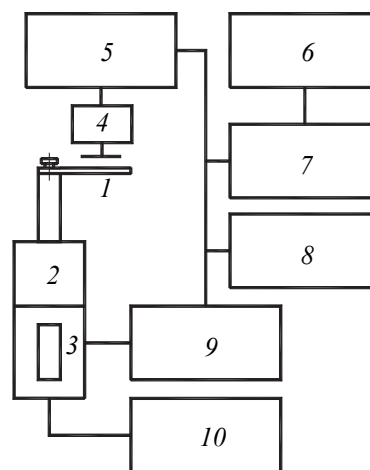


Рис. 2. Схема магнестрикционного стенда:

- 1 – образец; 2 – концентратор;
- 3 – магнестриктор; 4 – вибромметр;
- 5 – прибор стабилизации амплитуды;
- 6 – регистратор; 7 – частотомер;
- 8 – осциллограф; 9 – усилитель;
- 10 – блок подмагничивания

Источником механических колебаний в установке служит магнестрикционный преобразователь, работающий в резонансном режиме (18 кГц) для достижения приемлемого уровня циклических напряжений, достаточного для разрушения испытываемого образца. Автоматическое поддержание постоянной амплитуды колебаний образца осуществляется с помощью прибора стабилизации амплитуды ПСА, включающего в себя управляемый усилитель с использованием фазовращателя, ограничителя и фильтров, настроенных на собственные частоты колебаний преобразователей и образцов. Между преобразователями и образцами (для высоких частот) устанавливаются концентраторы с коэффициентами усиления, позволяющие достичь необходимого уровня циклических напряжений в материале образца. Измерение амплитуды колебаний образцов на второй собственной форме колебаний осуществляется с помощью виброметра и контролируется оптическим микроскопом [5].

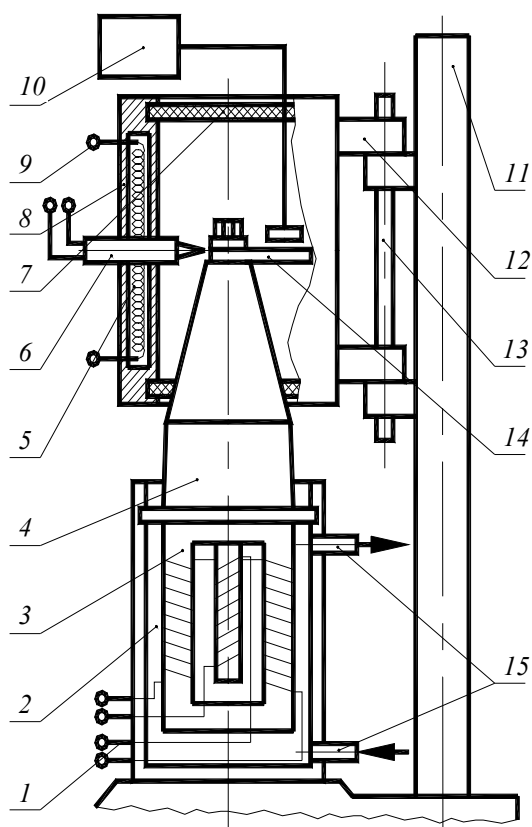


Рис. 3. Схема стенда для испытаний при повышенной температуре:

- 1 – токопроводящие провода; 2 – корпус;
3 – магнестриктор; 4 – концентратор;
5 – нагревательная спираль; 6 – термopара;
7 – теплоизолирующие прокладки; 8 – печь;
9 – контакты печи; 10 – виброметр МРТИ;
11 – стойка; 12 – кронштейны; 13 – ось;
14 – образец; 15 – патрубки

Характеристики исследуемого сплава

Маркировка сплава	Содержание Fe, %	Технология получения и состояние поверхности
11	0,40	Плавка под покровно-рафинирующим флюсом (62% NaCl, 13% KCl, 25% NaF) + модифицирование по пат. № 57584А, затем литье и термообработка по режиму Т6. Импульсная лазерная обработка на установке КВАНТ-12 с оплавлением поверхности, время импульса 4 мс, длина волны 0,6943 мкм, перекрытие пятен – 30%. Зона лазерного воздействия глубиной около 200 мкм
33	0,92	
55	1,45	

Образцы подвергались нагружению на второй собственной форме колебаний. Размеры и форма образцов были выбраны такими, что усталостное разрушение происходило в месте максимальных циклических напряжений, расположенных примерно посередине прямолинейного участка, что позволяло удобно исследовать изменение свойств материала и развитие усталостной трещины [8–10].

Усталостные кривые для сплава с различным содержанием железа и состоянием поверхности представлены на рис. 4, а–в, а фрактография усталостных изломов – на рис. 5.

В ходе проведения исследований было установлено, что лазерная обработка существенно влияет как на внешний вид поверхности исследованных вариантов сплава, делая ее более шероховатой, так и на структурные составляющие поверхностных слоев, приводя к оптически более гомогенной структуре, одновременно вызывая появление газовых включений существенной величины, по которым и проходит фронт усталостного повреждения.

Кинетику повреждения образца оценивали по падению резонансной частоты колебаний с развитием усталостной трещины. После достижения определенной величины падения частоты испытания прекращались.

Исследования полученной диаграммы распределения усталостных трещин по длине образцов позволили установить хорошее совпадение места появления усталостных трещин с местоположением максимума расчетной величины циклических напряжений для данной формы колебаний образца (рис. 6).

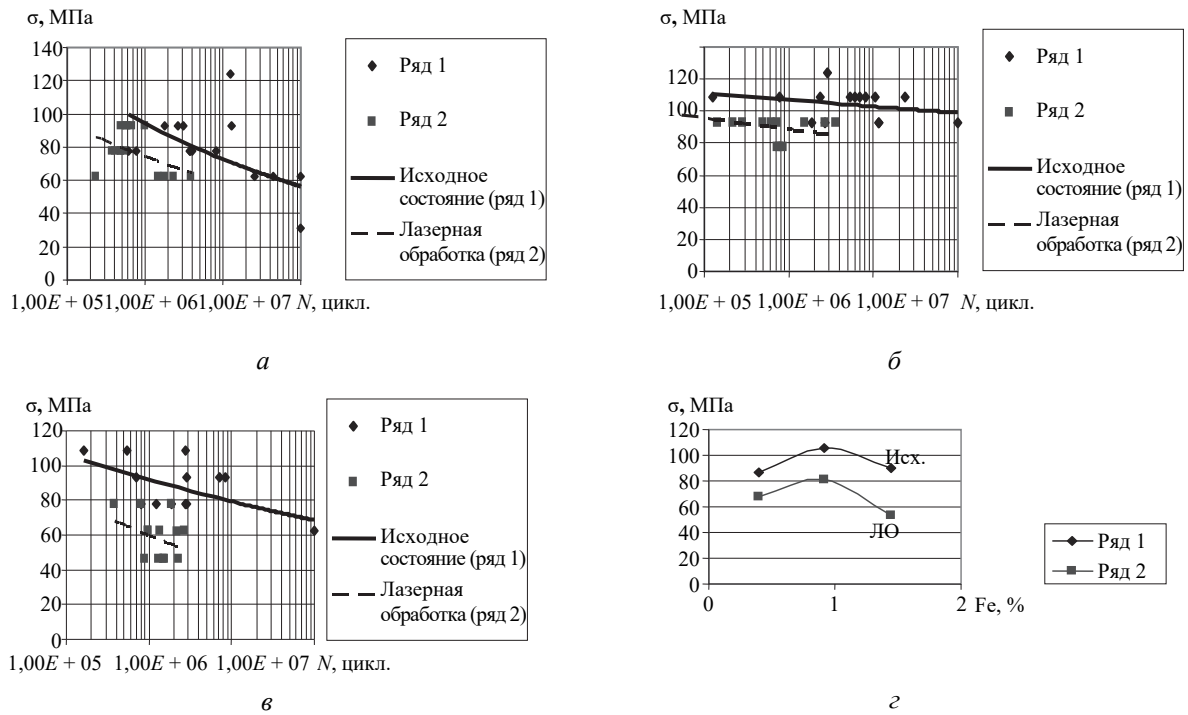


Рис. 4. Усталостные кривые для образцов с различным содержанием железа в сплаве АК8М3 (а – 0,40% Fe; б – 0,92% Fe; в – 1,45% Fe) и после лазерной обработки поверхности на ограниченный предел выносливости на базе $N = 2 \cdot 10^6$ циклов (г): Исх. – исходное состояние; ЛО – лазерная обработка

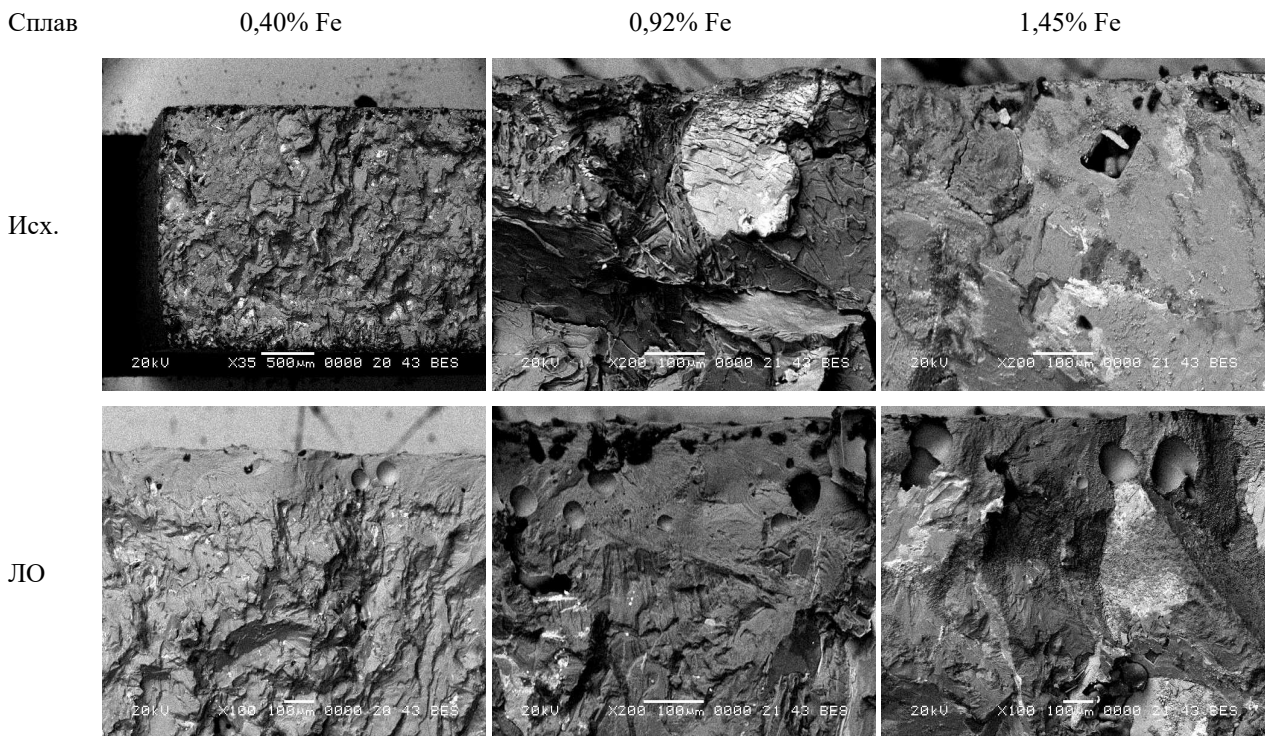


Рис. 5. Фрактография высокочастотных усталостных изломов для образцов с различным содержанием железа в сплаве АК8М3: Исх. – исходное состояние; ЛО – лазерная обработка

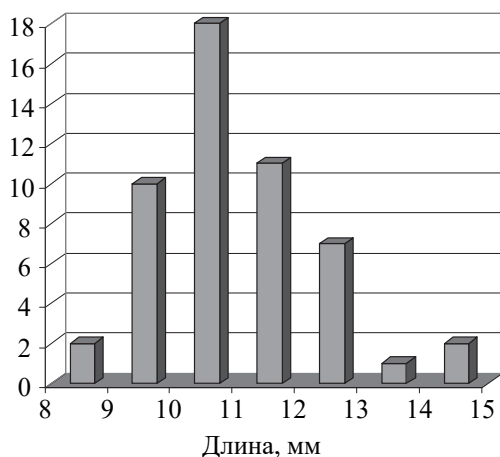


Рис. 6. Диаграмма распределения усталостных трещин по длине образцов

Как можно заметить из представленных фотографий, лазерное воздействие существенно влияет на поведение исходной литой структуры всех сплавов и приводит к значительным ее изменениям [11]. Так, наряду с увеличением гомогенности структуры, лазерная обработка приводит к появлению в зоне термического влияния газовых полостей округлой формы, через которые и проходит усталостная трещина.

Совокупность данных изменений неоднозначно влияет на поведение усталостных характеристик для всех исследованных вариантов сплава. С одной стороны, для фронта усталостной трещины слой лазерного воздействия из-за отсутствия значительных неоднородностей в объеме, способствующих увеличению концентрации слабых элементов структуры, представляет большее сопротивление ее развитию по сравнению с показателями исходной структуры. Но с другой стороны, шероховатость поверхности и газовые включения под поверхностным слоем способствуют зарождению данных трещин и, таким образом, являются факторами, существенно снижающими общие характеристики усталости. Представляется возможным, что подбором параметров лазерного воздействия на данный класс сплавов можно получать однородные структуры, которые не будут иметь дефектов в виде крупных газовых включений, благодаря чему будут

обладать повышенными характеристиками сопротивления усталости.

Заключение. На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Использование высокочастотного нагружения позволяет проводить сравнительные испытания конструкционных материалов с существенным ускорением процесса исследований и с повышенной достоверностью результатов за счет большего количества испытанных объектов при приемлемом уровне трудозатрат и экономии энергоресурсов.

2. Экспериментально установлена оптимальная величина процентного содержания железа в исследуемом сплаве с точки зрения повышенного уровня его усталостных свойств, которую можно принять в пределах 1%, с допустимой величиной отклонения не более 0,5% Fe. Можно предположить, что такое влияние примеси железа сохранится и для других видов обработки поверхности данного сплава.

3. Установлено, что лазерная обработка существенно влияет как на внешний вид поверхности исследованных вариантов сплава, делая ее более шероховатой, так и на структурные составляющие поверхностных слоев, приводя к оптически более гомогенной структуре, одновременно вызывая появление газовых включений существенной величины, по которым и проходит фронт усталостного повреждения.

4. Таким образом, установлено, что использованные в данной работе параметры лазерной технологии упрочнения не могут быть рекомендованы для повышения уровня усталостных характеристик исследованного сплава. Для правильного выбора параметров лазерного упрочнения необходимо проведение дальнейших исследований в данном направлении.

5. Результаты данной работы являются хорошей иллюстрацией эффективного применения метода высокочастотного нагружения [2] для оперативного выявления дефектов, привносимых либо исследуемой технологией, либо нарушением традиционной упрочняющей технологии, что существенно влияет на усталостные характеристики конструкционных материалов.

Список литературы

1. Ефименко Г. Г., Михеева И. Г., Павлышин Т. Н. Сталь и альтернативные материалы. Проблемы экономики и экологии // *Металл и литье Украины*. 1997. № 8–9. С. 3–8.
2. Блохин А. В., Царук Ф. Ф., Гайдук Н. А. Комплекс оборудования для усталостных испытаний элементов технологического оборудования // *Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообработ. пром-сть*. 2002. Вып. X. С. 213–215.
3. Матохнюк Л. Е. Ускоренные усталостные испытания высокочастотным нагружением. Киев: Наукова думка, 1988. 199 с.
4. Довгялло И. Г., Царук Ф. Ф., Новицкий А. В. Комплекс для усталостных испытаний металлических материалов при повышенных температурах // *Современные направления развития производ-*

- ственных технологий и робототехника: материалы междунар. науч.- техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 1999 г. Могилев, 1999. С. 326.
5. Tsaruck F., Novitskiy A. Method of the accelerated prediction of fatigue properties of metals at normal and heightened temperatures by results of high-frequency tests // ISTF 2000: proceedings of III international symposium on tribo-fatigue. Hunan, China, 2000. P. 193–195.
6. Кузьменко В. А. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения. Киев: Наукова думка, 1979. 336 с.
7. Estimation of influence of frequency of flexural vibrations of structural sensitive characteristics of 20x13 steel / I. Dovgyallo [et al.] // Creep and Coupled Processes: the 4th International Symposium. Bialostok, 1992. P. 57–63.
8. Belsky S. E. Equipment complex for ensuring the research of the characteristics of multi-cycle fatigue using high loading frequencies // Proceeding of BSTU. Series 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources. 2019. No. 2 (216). P. 201–206.
9. Анализ кинетики физико-механических характеристик при проведении усталостных испытаний инструментальной стали / С. Е. Бельский [и др.] // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 86-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 31 янв. – 12 февр. 2022 г. Минск, 2022. С. 292–295.
10. Царук Ф. Ф., Бельский С. Е. Влияние содержания железа и лазерной обработки на высокочастотные усталостные свойства сплава АК8М3 // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2010. Вып. XVII. С. 323–326.
11. Strain state and microstructure evolution of AISI-316 austenitic stainless steel during high-pressure torsion (HPT) process in the new stamp design / A. Volokitin [et al.] // Metalurgiya. 2021. No. 60 (3-4). P. 325–328.

References

1. Efimenko G. G., Mikheeva I. G., Pavlyshin T. N. Steel and alternative materials. Problems of economy and ecology. *Metall i lit'ye Ukrainy* [Metal and casting of Ukraine], 1997, no. 8–9, pp. 3–8 (In Russian).
2. Blokhin A. V., Tsaruk F. F., Gaiduk N. A. Complex of equipment for fatigue testing of elements of technological equipment. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forestry and Woodworking Industry, 2002, issue X, pp. 213–215 (In Russian).
3. Matokhnyuk L. E. *Uskorennyye ustalostnyye ispytaniya vysokochastotnym nagruzheniyem* [Accelerated fatigue testing by high-frequency loading]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1988. 199 p. (In Russian).
4. Dovgyallo I. G., Tsaruk F. F., Novitskiy A. V. Complex for fatigue testing of metallic materials at elevated temperatures. *Sovremennyye napravleniya razvitiya proizvodstvennykh tekhnologiy i robototekhniki: materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Modern directions of development of production technologies and robotics: proceedings of the International. scientific and technical conference]. Mogilev, 1999, p. 326 (In Russian).
5. Tsaruck F., Novitskiy A. Method of the accelerated prediction of fatigue properties of metals at normal and heightened temperatures by results of high-frequency tests. *ISTF 2000: Proceedings of III international symposium on tribo-fatigue*. Hunan, China, pp. 193–195.
6. Kuzmenko V. A. *Ustalostnyye ispytaniya na vysokikh chastotakh nagruzheniya* [Fatigue tests at high loading frequencies]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1979. 336 p. (In Russian).
7. Dovgyallo I., Tsaruck F., Dolbin N., Dovgyallo A. Estimation of influence of frequency of flexural vibrations of structural sensitive characteristics of 20x13 steel. *Creep and Coupled Processes: the 4th International Symposium*. Bialostok, 1992, pp. 57–63.
8. Belsky S. E. Equipment complex for ensuring the research of the characteristics of multi-cycle fatigue using high loading frequencies. *Proceeding of BSTU*, series 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2019, no. 2 (216), pp. 201–206.
9. Belsky S. E., Tsaruk F. F., Pishchov M. N., Adel Rashid. Analysis of the kinetics of physical and mechanical characteristics during fatigue testing of tool steel. *Technologiya organicheskikh veshchestv: materialy 87-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sortudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Technology of organic substances: materials of the 87th scientific and technical conference of faculty, researchers and graduate students (with international participation)]. Minsk, 2022, pp. 292–295 (In Russian).
10. Tsaruk F. F., Belsky S. E. Effect of iron content and laser treatment on the high-frequency fatigue properties of the AK8M3 alloy. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forestry and Woodworking Industry, 2010, issue XVII, pp. 323–326 (In Russian).

11. Volokitin A., Volokitina I., Panin E., Naizabekov A., Lezhnev S. Strain state and microstructure evolution of AISI-316 austenitic stainless steel during high-pressure torsion (HPT) process in the new stamp design. *Metalurgiya*, 2021, no. 60 (3-4), pp. 325–328.

Информация об авторах

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

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

Царук Федор Федорович – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и проектирования технических систем. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Tsaruk@belstu.by

Information about the authors

Pishchov Mikhail Nikolayevich – 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

Belsky Sergey Efgrafovich – PhD (Engineering), 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

Tsaruk Fedor Fedorovich – 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: Tsaruk@belstu.by

Поступила 10.03.2023

УДК 674.093.6

С. А. Гриневич, Д. П. Бабич, А. В. Макаревич
Белорусский государственный технологический университет
**ОЦЕНКА УПРОЩЕННОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
РЕЖИМОВ ПИЛЕНИЯ**

В статье произведена оценка упрощенного метода определения скорости подачи бревен при их распиловке на лесопильных станках различного типа. Необходимость проведения данной работы вызвана важностью правильного определения этого параметра режима пиления как для разработки грамотного технологического процесса распиловки бревен с получением качественной пилопродукции, так и для корректного планирования работы лесопильных цехов. Существующие методы точного расчета скорости подачи весьма трудо- и времязатратны, поэтому использование упрощенного метода позволит значительно облегчить работу технологов лесопильных предприятий. Однако следует убедиться в том, что исследуемый метод позволяет рассчитывать скорость подачи с небольшой погрешностью и, следовательно, может применяться для практических и учебных расчетов.

При проведении анализа исследуемого метода расчета авторы предположили, что скорость подачи находится в обратно пропорциональной зависимости от диаметра распиливаемых бревен. Таким образом, зная из характеристик станка минимальную и максимальную скорости подачи, а также минимальный и максимальный диаметры распиливаемых бревен, можно эту зависимость найти и использовать для определения скорости подачи для других диаметров обрабатываемого материала. Анализ методов для точного расчета показал, что при использовании как метода расчета, разработанного профессором А. Л. Бершадским, так и степенной формулы зависимость скорости подачи от диаметра бревен носит более сложный характер. Были проведены расчеты с целью определения величины погрешности расчета скорости подачи при использовании упрощенного метода в сравнении с методом профессора А. Л. Бершадского. После анализа результатов этих расчетов были сделаны следующие основные выводы: методика упрощенного расчета скорости подачи может применяться для станков, в которых максимальная и минимальная скорости подачи определяются условием полного использования мощности привода узла резания; погрешность определения скорости подачи уменьшается с уменьшением диапазона диаметров бревен, которые могут быть распилены на станке.

Ключевые слова: бревно, скорость подачи, упрощенный метод, подача на зуб, погрешность.

Для цитирования: Гриневич С. А., Бабич Д. П., Макаревич А. В. Оценка упрощенного метода определения режимов пиления // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 245–250. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-29.

S. A. Grinevich, D. P. Babich, A. V. Makarevich
Belarusian State Technological University
**EVALUATION OF A SIMPLIFIED METHOD FOR SAWING
REGIMES DETERMINING**

The article assesses a simplified method of determining the feed rate of logs when sawing them with sawmill machines of different types. The necessity of this work is caused by the importance of correct determination of this parameter of sawing mode as for the development of a competent technological process of log sawing with obtaining of qualitative lumber products, and for correct planning of sawmills' work. Existing methods of accurate calculation of feed rate are very labor- and time-consuming, so the use of a simplified method will greatly simplify the work of sawmill technologists. However, it is necessary to make sure that the investigated method allows to calculate the feed rate with a small error and, consequently, can be used for practical and educational calculations.

During the analysis of the investigated method of feed rate calculation it was found that its authors assumed that the feed rate is in inverse proportional dependence on the diameter of sawn logs. Thus, knowing from the machine characteristics the minimum and maximum feed rate, as well as the minimum and maximum diameter of the sawing logs, this dependence can be found and used to determine the feed rate for other diameters of the processing material. Analysis of methods for exact calculation showed that both when using the calculation method developed by Professor A. L. Bershadsky, and when using the power formula, the dependence of the feed rate on the diameter of logs has a more complex nature. Calculations to determine the magnitude of the error in calculating the feed rate when using the simplified method in comparison with the method of Professor Bershadsky were conducted. Having analyzed the

results of these calculations the following main conclusions were made. The method of simplified calculation of the feed rate can be used for machines in which the maximum and minimum feed rates are determined by the condition of full use of the power of the cutting unit drive. The error in determining the feed rate decreases as the range of log diameters that can be sawn on the machine decreases.

Keywords: log, feed rate, simplified method, feed per tooth, error.

For citation: Grinevich S. A., Babich D. P., Makarevich A. V. Evaluation of the simplified method for sawing regimes determining. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 245–250. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-29 (In Russian).

Введение. Продольная распиловка бревен является первой технологической операцией механической обработки древесины. Для выполнения этой операции в настоящее время применяется большое количество разнообразного оборудования: лесопильные рамы, круглопильные и ленточнопильные станки, фрезернопильные станки и линии. Все перечисленные типы станков имеют свои достоинства и недостатки, но на каждом из них можно получить качественную продукцию, если применять рациональные режимы распиловки. Основным параметром режима пиления древесины, влияющим на качество получаемой продукции, а также на производительность лесопильного оборудования, является скорость подачи сырья.

Скорость подачи бревен при их продольной распиловке зависит от большого количества факторов, которые определяются характеристиками сырья (например, порода и влажность древесины, диаметр бревен), характеристиками применяемого оборудования (установленная мощность), характеристиками используемого инструмента (количество зубьев пилы, объем впадин зубьев, ширина пропила) и требованиями к качеству получаемых пиломатериалов (шероховатость их поверхности). При этом скорость подачи следует выбирать так, чтобы обеспечивалась наибольшая производительность лесопильного оборудования.

Правильное определение скорости подачи важно не только при разработке технологического режима пиления древесного сырья, но и при планировании работы лесопильного цеха, а именно при определении производительности бревнопильного оборудования [1]. Ошибка при определении производительности лесопильного оборудования, вызванная неправильно определенной скоростью подачи, может привести к невыполнению производственного плана. Кроме того, при использовании лесопильных линий, состоящих из нескольких бревнопильных станков, неправильное определение скорости подачи для каждого из них может привести к нарушению ритмичности работы всей линии и снижению ее фактической производственной мощности по сравнению с расчетной.

Учитывая важность этого параметра режима пиления, многие ученые занимались разработкой

методики его определения [2–4], из недавних исследований можно выделить работу [5]. На основании этих исследований еще в СССР были разработаны нормативные документы по определению рациональных скоростей подачи бревен [6–8]. Следует отметить, что все вышеупомянутые методики по определению рациональных скоростей подачи требуют выполнения достаточно трудоемких и затратных по времени расчетов. Для облегчения труда технологов лесопильных предприятий в нашем университете проводились работы по построению графиков для определения скоростей подачи при распиловке бревен и брусев на многопильных круглопильных станках [9]. Однако эти графики справедливы только для многопильных круглопильных станков определенных марок, а в настоящее время в лесопильных цехах предприятий нашей страны устанавливаются бревнопильные станки различных производителей и разных типов, для которых построенные графики не могут быть использованы. Требуется либо разработка более универсальных графиков для определения скорости подачи независимо от типа и марки применяемого оборудования, либо применение упрощенных методов по определению рациональной скорости подачи. Один из таких методов представлен в работах [10, 11].

Целью данной работы является оценка точности определения скорости подачи с использованием упрощенного метода, а также возможности его применения для практических расчетов.

Основная часть. Согласно работам [10, 11] примерная скорость подачи бревен может быть определена по следующей системе формул (1):

$$\begin{cases} \frac{G_0}{d_{\max}} + G_1 = V_{S_{\min}}; \\ \frac{G_0}{d_{\min}} + G_1 = V_{S_{\max}}, \end{cases} \quad (1)$$

где G_0 и G_1 – коэффициенты аппроксимации; d_{\max} – наибольший диаметр бревен, мм; $V_{S_{\min}}$ – минимальная скорость подачи распиливаемого сырья, м/мин; d_{\min} – наименьший диаметр бревен, мм; $V_{S_{\max}}$ – максимальная скорость подачи распиливаемого сырья, м/мин.

Полученные в результате решения системы (1) коэффициенты аппроксимации G_0 и G_1 подставляются в формулу (2) для определения скорости подачи V_S :

$$V_S = \frac{G_0}{d} + G_1, \quad (2)$$

где d – произвольный диаметр бревна, для которого определяется скорость подачи, мм.

Коэффициенты аппроксимации G_0 и G_1 определяются один раз для выбранного типа оборудования.

Таким образом, в данной методике предполагается, что скорость подачи бревна обратно пропорциональна его диаметру. Причем подчеркивается, что полученная скорость подачи примерная. Для использования данной методики необходимо оценить точность получаемого результата.

Согласно теории профессора А. Л. Бершадского [2, 12] средняя касательная сила резания определяется как

$$F = \left[a_p \cdot p \cdot b + S_z \cdot \sin \Theta \cdot (k \cdot b + \alpha \cdot h) \right] \cdot \frac{l}{t}, \quad (3)$$

где a_p – коэффициент, учитывающий затупление зуба; p – фиктивная удельная сила резания по задней поверхности зуба, Н/мм; b – ширина пропила, мм; S_z – подача на зуб, мм; Θ – средний кинематический угол встречи, град; k – среднее давление резания по передней поверхности зуба, Н/мм²; α – коэффициент интенсивности трения, прессования и перемещения стружки во впадине зуба, Н/мм²; h – высота пропила, мм; l – длина дуги контакта, мм; t – шаг зуба, мм.

Диаметр распиливаемого бревна d определяет величину высоты пропила h .

Величина средней касательной силы резания может быть определена из технической характеристики оборудования по соотношению:

$$F = \frac{1000 \cdot P}{V}, \quad (4)$$

где P – полезная мощность на резание, кВт; V – скорость резания, м/с.

Для конкретного оборудования F является величиной постоянной.

Из формулы (3) выразим подачу на зуб S_z :

$$S_z = \frac{F \cdot \frac{t}{l} - a_p \cdot p \cdot b}{\sin \Theta \cdot (k \cdot b + \alpha \cdot h)}, \quad (5)$$

Для наглядности и простоты рассмотрим процесс ленточного пиления. В этом случае выражение (5) упрощается, так как средний кинематический угол встречи $\Theta \approx 90^\circ$. Соответственно, $\sin \Theta = 1$, $l = h$, а величины p и k становятся константами (не зависят от h) [12, 13].

Тогда выражение (5) переписывается в виде

$$S_z = \frac{F \cdot \frac{t}{h} - a_p \cdot p \cdot b}{k \cdot b + \alpha \cdot h} \quad (6)$$

или

$$S_z = \frac{F \cdot t}{k \cdot b \cdot h + \alpha \cdot h^2} - \frac{a_p \cdot p \cdot b}{k \cdot b + \alpha \cdot h}. \quad (7)$$

Величина S_z определяет скорость подачи V_S [13, 14]:

$$V_S = \frac{60 \cdot S_z \cdot V}{t}. \quad (8)$$

Подставив выражение (7) в (8), получим следующую формулу:

$$V_S = \left[\frac{F \cdot t}{k \cdot b \cdot h + \alpha \cdot h^2} - \frac{a_p \cdot p \cdot b}{k \cdot b + \alpha \cdot h} \right] \cdot \frac{60 \cdot V}{t}. \quad (9)$$

Таким образом, согласно теории резания профессора А. Л. Бершадского зависимость скорости подачи от высоты пропила (диаметра бревна) носит более сложный характер, чем предлагается в выражении (2).

Рассмотрим метод расчета по степенным формулам [3, 4]:

$$P = C_p \cdot S_z^a \cdot h^K \cdot V^{1,2} \cdot \delta^{1,14} \cdot \rho^{0,28} \cdot W^{0,05} \times \gamma_0^{1,45} \cdot b^m, \quad (10)$$

где C_p , a , K , m – константы, зависящие от способа уширения пропила; ρ – радиус затупления зуба пилы, мкм; W – влажность древесины, %.

Аналогично, из формулы (10) выразим подачу на зуб S_z :

$$S_z = \sqrt[a]{\frac{P}{C_p \cdot h^K \cdot V^{1,2} \cdot \delta^{1,14} \cdot \rho^{0,28} \cdot W^{0,05} \cdot \gamma_0^{1,45} \cdot b^m}}. \quad (11)$$

Так как только один сомножитель содержит h , а остальные являются константами, то можно записать

$$S_z = \frac{A}{h^a}, \quad (12)$$

где A – константа.

Так, для плющенных зубьев $a = 0,97$; $K = 1,43$, а для разведенных $a = 0,88$; $K = 1,41$ [3].

Тогда подача на зуб для пилы с плющеными зубьями

$$S_{z\Delta} = \frac{A}{h^{1,47}}, \quad (13)$$

а с разведенными зубьями

$$S_{z\lambda} = \frac{A}{h^{1,6}}. \quad (14)$$

С учетом полученных выражений (13) и (14) зависимость (8) может быть записана для ленточных пил с плющеными и разведенными зубьями как

$$V_{S_{\Delta}} = \frac{60 \cdot A \cdot V}{t \cdot h^{1,47}}, \quad (15)$$

$$V_{S_{\lambda}} = \frac{60 \cdot A \cdot V}{t \cdot h^{1,6}}. \quad (16)$$

Выражения (15) и (16) также не соответствуют обратной пропорциональности.

Проверим зависимости на практике. Выполним расчет скорости подачи для отечественного вертикального ленточнопильного станка ЛБ100-1 по методике проф. А. Л. Бершадского. Для данного станка диаметр бревен составляет от 100 до 600 мм. Результат расчета приведен в виде графика на рис. 1. Согласно расчету $V_{S_{\min}} = 7$ м/мин, $V_{S_{\max}} = 141$ м/мин.

Выполним аппроксимацию по предложенному упрощенному методу, приняв следующие значения $d_{\min} = 100$ мм; $d_{\max} = 600$ мм; $V_{S_{\min}} = 7$ м/мин, $V_{S_{\max}} = 141$ м/мин.

Решая систему уравнений (1) с указанными параметрами, получим $G_0 = 16\,080$; $G_1 = -19,8$. Подставив эти значения в уравнение (2), построим график (рис. 1).

На рис. 1 показано, что зависимости довольно близки, но при использовании аппроксимирующей зависимости привод станка будет перегружен. Максимальное отклонение аппроксимирующей зависимости от зависимости, построенной по методике профессора А. Л. Бершадского, наблюдается при $h = 208$ мм и составляет 15,1%.

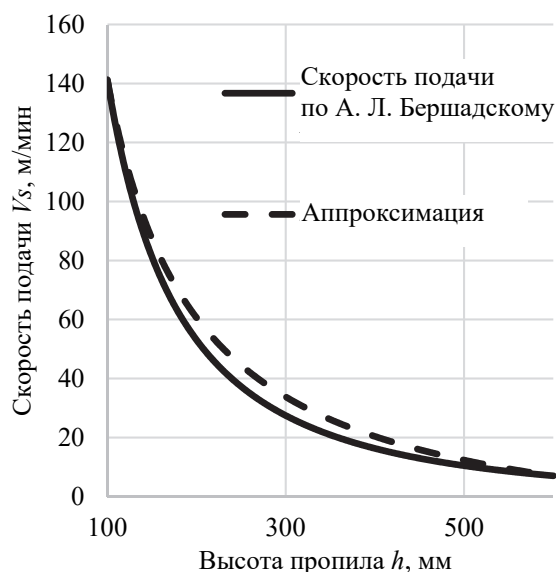


Рис. 1. График зависимости скорости подачи от высоты пропила с учетом полного использования мощности привода главного движения

Очевидно, что чем меньше рассматриваемый диапазон высот пропила, тем меньше будет разность значений. Например, при расчете для диапазона диаметров бревен от 300 до 600 мм отклонение существенно уменьшается и составляет всего 5,8%.

Однако деревообрабатывающее оборудование, как правило, проектируется таким образом, чтобы минимальной скорости подачи соответствовала распиловка максимального диаметра бревна максимальным количеством пил. Максимальная же скорость подачи может ограничиваться не возможностями узла резания, а конструкторски.

По технической характеристике скорость подачи на станке ЛБ100-1 варьируется от 5 до 45 м/мин. Таким образом, при распиловке диаметров меньше чем 222 мм привод резания станка будет недогружен, и фактический график зависимости скорости подачи от высоты пропила будет выглядеть, как на рис. 2.

Выполним аппроксимацию по технической характеристике станка, приняв $d_{\min} = 100$ мм; $d_{\max} = 600$ мм; $V_{S_{\min}} = 5$ м/мин, $V_{S_{\max}} = 45$ м/мин.

Решая систему уравнений (1) с вышеуказанными параметрами, получим $G_0 = 4800$; $G_1 = -3$. Подставив эти значения в уравнение (2), построим график (рис. 2). Очевидно, что при использовании аппроксимирующей зависимости привод станка будет уже недогружен. Наибольшая разбежка между значениями скорости подачи, полученными по теории А. Л. Бершадского и по выражению (2), наблюдается при $h = 222$ мм и достигает 26,4%.

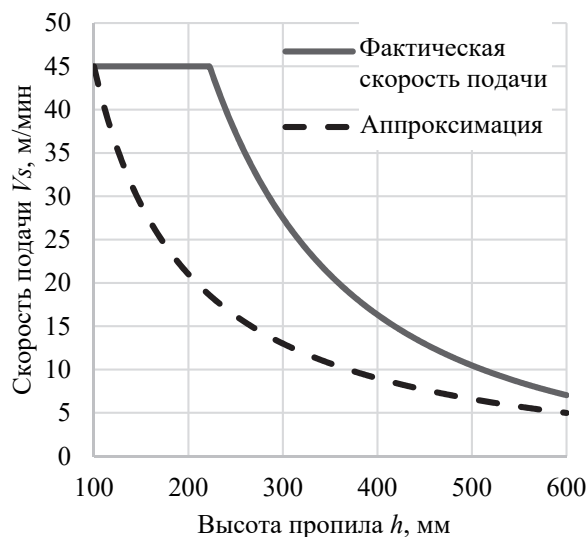


Рис. 2. График зависимости скорости подачи от высоты пропила с учетом полного использования мощности привода главного движения и ограничений привода подачи

Заключение. Проведя теоретические исследования, в частности для ленточного пиления, установлено, что зависимость скорости подачи

от высоты пропила (диаметра распиливаемого бревна) носит более сложный характер, чем предполагает упрощенный метод.

В результате выполнения расчетов скорости подачи для промышленного ленточнопильного станка ЛБ100-1 по теории А. Л. Бершадского и по упрощенному методу получено, что максимальное расхождение между ними составляет до 15,1%.

При уменьшении диапазона диаметров распиливаемого материала расхождение значений скорости подачи уменьшается. Так, в рассмотрен-

ном примере при уменьшении диапазона диаметров с 500 до 300 мм максимальное отклонение в результатах расчета составило 5,8%.

В случае если максимальная скорость подачи ограничена конструктивно, то применение упрощенного метода даст существенную ошибку. В частности, для станка ЛБ100-1 использование упрощенного метода привело к занижению скорости подачи, а соответственно, и спаду производительности до 26,4%, что, безусловно, весьма существенно.

Список литературы

1. Калитеевский Р. Е. Лесопиление в 21 веке. Технология, оборудование, менеджмент. СПб.: ПрофиКС, 2008. 499 с.
2. Бершадский А. Л., Цветкова Н. И. Резание древесины. Минск: Выш. шк., 1975. 303 с.
3. Грубе А. Э., Санев В. И. Основы теории и расчета деревообрабатывающих станков, машин и автоматических линий. М.: Лесная пром-сть, 1973. 384 с.
4. Любченко В. И. Резание древесины и древесных материалов: учеб. пособие для вузов. М.: Лесн. пром-сть, 1986. 296 с.
5. Щепочкин С. В. Режимы резания древесины в круглопильных станках по теплостойкости материала инструмента: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05. Екатеринбург, 2012. 16 с.
6. Остроумов И. П., Кумин В. К., Прокопьев Г. Ф. Руководящие технические материалы по определению режимов пиления (посылок) бревен и брусьев хвойных и лиственных пород на лесопильных рамах. Архангельск: ЦНИИМОД, 1987. 82 с.
7. Стахийев Ю. М., Пашков В. К. Руководящие технические материалы по определению режимов пиления древесины круглыми пилами. Архангельск: ЦНИИМОД, 1988. 74 с.
8. Жернокуй М. А. Руководящий технический материал. Режимы пиления на ленточнопильных станках. Красноярск: СибНИИЛП, 1986. 30 с.
9. Лисица В. С., Фидельский С. С., Бабич Д. П. Диаграммы для определения скорости подачи бревен и брусьев при их распиловке на многопильных круглопильных станках // 72-я науч.-техн. конф. учащихся, студентов и магистрантов: сб. науч. работ, Минск, 12–23 апр. 2021 г. Минск, 2021. С. 182–184.
10. Тамби А. А., Артеменков А. М. Технология лесопильного производства. Планирование раскроя сырья и расчет производственной мощности лесопильного цеха: учеб. пособие. Якутск: ЯГСХА, 2019. 76 с.
11. Методика расчета процессов обрезки досок / Р. Е. Калитеевский [и др.] // Лесной журнал. 2008. № 3. С. 101–106.
12. Бершадский А. Л. Расчет режимов резания древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1967. 175 с.
13. Гришкевич А. А. Механическая обработка древесины и древесных материалов, управление процессами резания: учеб.-метод. пособие. Минск: БГТУ, 2012. 109 с.

References

1. Kaliteevskiy R. E. *Lesopileniye v 21 veke. Tekhnologiya, oborudovaniye, menedzhment* [Sawmilling in the 21st century. Technology, equipment, management]. St. Petersburg, ProfiKS Publ., 2008. 499 p. (In Russian).
2. Bershadskiy A. L., Czvetkova N. I. *Rezaniye drevesiny* [Wood cutting]. Minsk: Vysheyshaya shkola Publ., 1975. 303 p. (In Russian).
3. Grube A. E., Saney V. I. *Osnovy teorii i rascheta derevoobrabatyvayushchikh stankov, mashin i avtomaticheskikh liniy* [Basics of theory and calculation of woodworking machines, machines and automatic lines]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 384 p. (In Russian).
4. Lyubchenko V. I. *Rezaniye drevesiny i drevesnykh materialov* [Cutting wood and wood materials]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1986. 296 p. (In Russian).
5. Shchepochkin S. V. *Rezhimy rezaniya drevesiny v kruglopil'nykh stankakh po teplostoykosti materiala instrumenta. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Cutting modes of wood in circular sawing machines according to the heat resistance of the tool material. Abstract of thesis PhD (Woodworking)]. Ekaterinburg, 2012. 16 p. (In Russian).
6. Ostroumov I. P., Kumin V. K., Prokop'ev G. F. *Rukovodyashchiye tekhnicheskkiye materialy po opredeleniyu rezhimov pileniya (posylok) breven i brus' yev khvoynykh i listvennykh porod na lesopil'nykh*

ramakh [Guiding technical materials for determining the modes of sawing (parcels) of logs and beams of coniferous and deciduous species on sawmills]. Arkhangel'sk, TsNIIMOD Publ., 1987. 82 p. (In Russian).

7. Stakhiev Yu. M., Pashkov V. K. *Rukovodyashchiye tekhnicheskiye materialy po opredeleniyu rezhimov pileniya drevesiny kruglymi pilami* [Technical guidelines for determining the modes of sawing wood with circular saws]. Arkhangel'sk, TsNIIMOD Publ., 1988. 74 p. (In Russian).

8. Zhernokuy M. A. *Rukovodyashchiy tekhnicheskiy material. Rezhimy pileniya na lentochnopil'nykh stankakh* [Technical guidance material. Sawing modes on band saws]. Krasnoyarsk, SibNIILP Publ., 1986. 30 p. (In Russian).

9. Lisitsa V. S., Fidel'skiy S. S., Babich D. P. Diagrams for determining the feed rate of logs and beams during their sawing on multi-saw circular sawing machines. *72-ya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya uchashchikhsya, studentov i magistrantov: sbornik nauchnykh rabot* [72nd scientific and technical conference of learner, students and undergraduates: collection of scientific papers]. Minsk, 2021, pp. 182–184 (In Russian).

10. Tambi A. A., Artemenkov A. M. *Tekhnologiya lesopil'nogo proizvodstva. Planirovaniye raskroya syr'ya i raschet proizvodstvennoy moshchnosti lesopil'nogo tsekha* [Technology of sawmill production. Planning of raw material cutting and calculation of the production capacity of the sawmill workshop]. Yakutsk, YaGSKhA Publ., 2019. 76 p. (In Russian).

11. Kaliteevskiy R. E., Tambi A. A., Gavryukov A. V., Artemenkov A. M., Toropov V. M. The method of calculating the processes of cutting boards. *Lesnoy zhurnal* [Forest journal], 2008, no. 3, pp. 101–106 (In Russian).

12. Bershadskiy A. L. *Raschet rezhimov rezaniya drevesiny* [Calculation of wood cutting modes]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1967. 175 p. (In Russian).

13. Grishkevich A. A. *Mekhanicheskaya obrabotka drevesiny i drevesnykh materialov, upravleniye protsessami rezaniya* [Mechanical processing of wood and wood materials, management of cutting processes]. Minsk, BGTU Publ., 2012. 109 p. (In Russian).

Информация об авторах

Гриневиц 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@yandex.ru

Бабич Дмитрий Павлович – старший преподаватель кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: babich_tdp@mail.ru

Макаревич Андрей Викторович – 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@yandex.ru

Babich Dmitriy Pavlovich – Senior Lecturer, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., Minsk, 220006, Republic of Belarus). E-mail: babich_tdp@mail.ru

Makarevich Andrey Viktorovich – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dosy@belstu.by

Поступила 15.03.2023

УДК 674.055:621.95:674.815

Т. А. Машорипова, А. Ф. Аникеенко

Белорусский государственный технологический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ СВЕРЛЕНИЯ ЛАМИНИРОВАННЫХ ДРЕВЕСНО-СТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ НА МОЩНОСТЬ РЕЗАНИЯ НА ЭТАПЕ ОТСЕИВАНИЯ МАЛОЗНАЧИМЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

В данной статье исследовано влияние режимов сверления ламинированных ДСтП на мощность резания. Установлено, что увеличение скорости подачи с 1 до 6 м/мин приводит к росту потребляемой мощности на 14 %. Для определения оптимальных технологических режимов, отвечающих современным требованиям к качеству и производительности, было проведено несколько экспериментов.

Объектом исследования являлись технологические режимы сверления ламинированных древесно-стружечных плит, а именно скорость подачи, варьируемая от 1 до 6 м/мин, и частота вращения инструмента от 1000 до 2000 мин⁻¹. Данные результаты могут быть полезны в процессе оптимизации производственных процессов, улучшения качества продукции и сокращения расходов на энергию.

Основная цель исследования заключалась в проведении эксперимента на машине с ЧПУ. Этот эксперимент основан на изучении зависимостей технологических режимов от состояния кромки отверстия и энергозатрат процесса сверления древесных материалов. Основное достижение этого эксперимента заключается в обеспечении требуемого качества процесса при высокой производительности и оптимальном энергопотреблении.

В процессе выполнения работы были проведены экспериментальные исследования, в результате которых были получены реальные зависимости технологических режимов от качества и энергопотребления. Были выполнены эксперименты, в которых применялись методы математического планирования для создания модели сверлильного процесса с учетом качества и прочности.

Ключевые слова: мощность, параметры, древесностружечная плита, сверление, сверло.

Для цитирования: Машорипова Т. А., Аникеенко А. Ф. Исследование влияния режимов сверления ламинированных древесно-стружечных плит на мощность резания на этапе отсеивания малозначимых переменных // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 251–256. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-30.

T. A. Mashoripova, A. F. Anikeenko
Belarusian State Technological University**STUDIES OF THE INFLUENCE OF DRILLING MODES OF LAMINATED CHIPBOARD ON CUTTING POWER AT THE STAGE OF SCREENING OUT INSIGNIFICANT VARIABLES**

In this article, the influence of drilling modes of laminated chipboard on cutting power is investigated. It was found that an increase in the feed rate from 1 to 6 m/min leads to an increase in power consumption by 14%. To determine the optimal technological modes that meet modern requirements for quality and productivity, several experiments were conducted.

The object of the study was the technological modes of drilling laminated chipboard, namely the feed rate varying from 1 to 6 m/min and the rotation speed of the tool from 1000 to 2000 min⁻¹. These results can be useful in the process of optimizing production processes, improving product quality and reducing energy costs.

The main purpose of the study was to conduct an experiment on a CNC machine. This experiment is based on the study of the dependencies of technological modes on the state of the hole edge and the energy consumption of the drilling process of wood materials. The main achievement of this experiment is to ensure the required quality of the process with high productivity and optimal energy consumption.

The method of carrying out the work – in the course of the work, experimental studies were carried out, as a result of which real dependences of technological regimes on quality and energy consumption were obtained.

Experiments were performed where mathematical planning methods were applied to create a model of the drilling process, taking into account quality and strength. As variable factors, the size of the feed rate, feed per tooth and tool diameter for each cutter were chosen.

Keywords: power, parameters, particle board, drilling, drill.

For citation: Mashoripova T. A., Anikeenko A. F. Studies of the influence of drilling modes of laminated chipboard on cutting power at the stage of screening out insignificant variables. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 251–256. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-30 (In Russian).

Введение. Одним из наиболее эффективных и оптимальных направлений деревообработки во всем мире является производство древесностружечных плит, где в качестве сырья используется низкосортная древесина и древесные отходы. Деревянные панели являются основным конструкционным материалом для изготовления мебели. Технология производства древесностружечных плит, как приоритет для развития технологий в мире за последние 15–20 лет включает использование высокопроизводительного оборудования, основанного на непрерывном давлении.

Производство древесностружечных и ламинированных плит в Республике Беларусь сосредоточено на предприятиях концерна «Беллесбумпром»: ОАО «Ивацевичдрев», ОАО «Речицадрев», ОАО «Витебскдрев» [1]. Республика Беларусь экспортирует около 50% производимых древесностружечных плит (включая ламинированные плиты) большей частью в Российскую Федерацию.

Динамика производства древесностружечных плит белорусским производственно-торговым концерном лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности «Беллесбумпром» представлена на рис. 1.

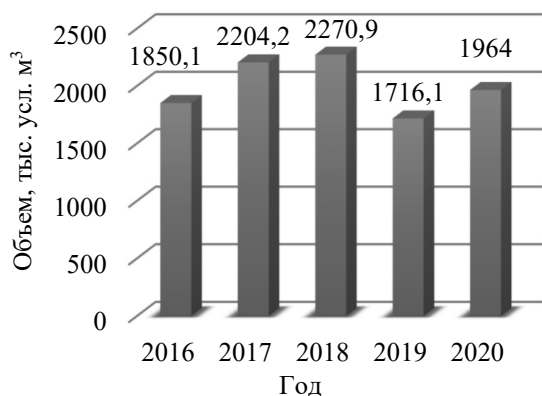


Рис. 1. Динамика производства ДСтП

Механическая обработка древесных материалов, особенно ламинированных ДСтП, связана с фундаментальной проблемой поддержания качества продукции. Неоднородная структура материала, разная его плотность и различное количество клея на вертикальном поперечном сечении говорит о том, что качество поверхности должно быть очень точным и его необходимо контролировать. На практике этот процесс должен происходить в режиме реального времени. Возможность для контроля этого процесса в режиме онлайн может дать визуальная система контроля качества.

Основным аспектом обрабатываемости является подробное изучение силы, крутящего момента, стойкости инструмента и чистоты поверхности. Хотя существует ряд взаимосвязанных факторов, влияющих на обрабатываемость материала,

наиболее важными из них являются параметры резания, свойства материала заготовки и инструмента, геометрия режущего инструмента, закрепление заготовки и тип станка.

Основная часть. Качество обработки зависит от разных показателей. Качество сверления воспринимается как состояние обрабатываемой поверхности или кромок элементов, оно чувствительно не только к износу инструмента, но и к параметрам резания, таким как подача на оборот или скорость резания [2]. Штумайер В. [3] доказал, что при фрезеровании ЛДСП со значениями подачи на оборот в диапазоне 0,5–2,5 мм и с увеличением скорости резания наблюдается небольшое ухудшение качества. Согласно работе [4], более высокая подача на зуб имеет невыгодное влияние на качество сверления ЛДСП. Однако увеличение скорости резания уменьшает повреждение кромок обрабатываемого материала в случае использования нового инструмента. Этот эффект слабее с увеличением износа инструмента [5]. Качество обработки в работе Лемастера Р. Л. и др. [6] определяется средней величиной расслоения материала, которое было улучшено с увеличением скорости вращения при встречном фрезеровании, а также при попутном фрезеровании кромок ДСтП. Другие исследователи, такие как Давим Ж. П. и др. [7], показали, что при сверлении отверстий на высоких скоростях резания в ламинированном ДСтП (Суперпан Декор) качество обработки незначительно становится лучше. С другой стороны, увеличение подачи на оборот влечет за собой ухудшение качества. В экспериментах были исследованы три скорости резания и пять скоростей подачи на оборот. Гаитонд В. Н. и др. в своей работе [8] заключили, что с увеличением скорости сверления в ламинированном ДСтП качество становилось хуже, но с уменьшением подачи на оборот наблюдался противоположный результат.

Разработка и применение оптимальных режимов резания являются важным фактором в повышении конкурентоспособности деревообрабатывающей промышленности. Древесностружечные плиты средней плотности широко используются при производстве различных изделий, но отсутствует расчетный метод для получения оптимальных режимов сверления этого типа материала. Некоторые производители деревообрабатывающего оборудования и инструмента дают рекомендации по режимам сверления ламинированных ДСтП, но они учитывают только общие аспекты и не обращают внимания на специфику материала [9–15].

Теоретические расчеты, как правило, приближены и не учитывают все факторы, которые могут влиять на переменную величину. Поэтому решения, полученные при помощи экспериментов, проверяют и дополняют теоретическими расчетами.

Развитие экспериментальных исследований и область их применения зависят от технических возможностей измерения и оборудования.

Обычно экспериментальное решение инженерных задач заключается в поиске закономерностей между входными параметрами процесса и выходными показателями. Эти закономерности позволяют оценить влияние входных переменных и управлять технологическим процессом, чтобы достичь его оптимальности.

Математически закономерность описывается уравнением типа:

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n),$$

где Y – оценочный показатель, являющийся функцией нескольких независимых входных переменных x . В простейшем случае это может быть одна переменная.

При формулировании математической задачи необходимо указать переменные факторы процесса и их диапазоны изменения, а также постоянные факторы и оценочные показатели.

Для фундаментальных исследований обычно используется однофакторное планирование, а для прикладных и промышленных исследований рекомендуется математическое планирование эксперимента.

Планы экспериментов для исследования процессов резания древесины и древесных материалов

описаны в работе А. А. Пижурин и М. С. Розенблита [16].

В качестве экспериментальной установки определен современный многооперационный деревообрабатывающий станок модели Rover B 4.35 с числовым программным управлением. Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

Станок состоит из станины, группы устройств, которые позволяют осуществлять позиционирование и блокировку обрабатываемой детали, а также из серии групп (оперативный блок), предназначенных для обработки детали.

Проведен ряд экспериментов с использованием метода математического планирования, который позволяет получить достоверные модели процесса сверления с учетом качества и мощности. В качестве переменных факторов выбраны скорость подачи, скорость главного движения, диаметр инструмента.

Для проведения эксперимента была составлена методическая сетка опытов, охватывающая различные технологические режимы обработки, согласно рекомендациям А. А. Пижурин [16].

Факторы проведения эксперимента и методическая сетка экспериментальных данных с указанием переменных факторов в кодированном и явном выражении представлены в табл. 1 и 2.



Рис. 2. Экспериментальная установка на базе обрабатывающего центра с числовым программным управлением Rover B 4.35

Таблица 1

Факторы проведения эксперимента

Переменный фактор	Уровни варьирования		
	верхний (+1)	основной (0)	нижний (-1)
1. Глубина сверления, мм [X_1]	38	24	10
2. Частота вращения, мин ⁻¹ [X_2]	2000	1500	1000
3. Скорость подачи, м/мин [X_3]	6	3,5	1
4. Тип плиты	ДСтП, ламинированная синтетическим материалом		
5. Диаметр сверла, мм	–	10	–
6. Толщина плиты, мм	–	28	–

Таблица 2

Методическая сетка экспериментальных данных

Номер опыта	Переменные факторы в кодированном выражении			Переменные факторы в явном выражении			Выходной параметр
	X_1	X_2	X_3	h , мм [X_1]	n , мин ⁻¹ [X_2]	V_s , м/мин [X_3]	
1	+	+	+	38	2000	6	0,19017
2	-	+	+	10	2000	6	0,118787
3	+	-	+	38	1000	6	0,12253
4	-	-	+	10	1000	6	0,143158
5	+	+	-	38	2000	1	0,101131
6	-	+	-	10	2000	1	0,124318
7	+	-	-	38	1000	1	0,118354
8	-	-	-	10	1000	1	0,127082
9	+	0	0	38	1500	3,5	0,108041
10	-	0	0	10	1500	3,5	0,121166
11	0	+	0	24	2000	3,5	0,120278
12	0	-	0	24	1000	3,5	0,116627
13	0	0	+	24	1500	6	0,105734
14	0	0	-	24	1500	1	0,102692

Основная серия опытов была проведена по плану полного факторного эксперимента типа 23. В качестве переменных были приняты основные факторы, определяющие режим резания: скорость подачи (V_s , м/мин), частота вращения инструмента (n , мин⁻¹) и глубина сверления (h , мм), выходной параметр – мощность (P , кВт). В опытах использовались ДСтП, ламинированные синтетическим материалом, толщиной 28 мм. Сверление проводилось винтовым сверлом с конической заточкой ($D = 10$ мм).

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 древесно-стружечной плиты фиксировалась мощность, затрачиваемая на резание, с реализацией методических сеток опытов по отсеиванию малозначимых переменных факторов.

Результаты эксперимента будут использоваться для дальнейших исследований, в том числе для построения уравнений регрессии, позво-

ляющих точнее оценить влияние рассматриваемых факторов на процесс сверления и качество обработки.

Заключение. Анализ полученных данных, представленных в табл. 2, показывает, что с увеличением частоты вращения с 1000 до 2000 мин⁻¹, скорости подачи с 1 до 6 м/мин и глубины сверления (h , мм) мощностные показатели возрастают на 14%. Результаты исследования показали, что переменные факторы имеют одинаковое влияние на затрачиваемую мощность при сверлении отверстий и качество обработки. Диапазон изменения глубины сверления не оказывает значительного влияния на процесс сверления ламинированных древесно-стружечных плит. Чтобы достичь более точных результатов, планируется использовать единую методику измерений и учитывать только те переменные факторы, влияние которых оценивается в пределах 3% и выше. Для предотвращения образования дефектов (сколов) на выходе и входе отверстия необходимо регулировать скорость подачи.

В дальнейших исследованиях планируется получить уравнение регрессии, что позволит более точно определить влияние различных факторов на процесс сверления ламинированных древесно-стружечных плит и качество обработки.

Список литературы

1. Белорусский производственно-торговый концерн лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности // Беллесбумпром. Режим доступа: <http://www.bellesbumprom.by> (дата обращения: 05.03.2023).
2. Cyra G. Studies on automatic control of wood routing using acoustic emission // The United Graduate School of Agricultural Science. 1997. Vol. 34 (3). P. 237–252.
3. Stuhmeier W. Fräsen von Spanplatten mit hochharten Schneidstoffen // TU Braunschweig, F-B VDI 2. 1989. Bd. 2 (181). S. 181–187.

4. Porankiewicz B. Tępienie się ostrzy i jakość przedmiotu obrabianego w skrawaniu płyt wiórowych. Poznań: Wyd. PTPN, 2003. 215 s.
5. Porankiewicz B. Zużycie ostrzy narzędzi przy frezowaniu płyt wiórowych. Poznań: Wyd. PTPN, 2000. 270 s.
6. Lemaste R. R. L., Lu L., Jackson S. The Use of Process Monitoring Techniques on CNC Wood Router. Part 2. Use of Vibration Accelerometer to Monitor Tool Wear and Workpiece Quality // *Forest Products Journal*. 2000. Vol. 50 (9). P. 59–64.
7. Davim J. P., Clemente V. V., Silva S. Drilling investigation of MDF (medium density fibreboard) // *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 203. P. 537–541.
8. Gaitonde V. N., Karnik S. R., Davim P. J. Taguchi Multiple-Performance Characteristics Optimization in Drilling of Medium Density Fibreboard (MDF) to Minimize Delamination Using Utility Concept // *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 196 (1). P. 73–78.
9. Сверлильный инструмент // Leuco. URL: https://www.leuco.com/RU/RU/Boring_Bits (дата обращения: 22.03.2023).
10. Сверла // Деревообрабатывающий инструмент LEITZ. URL: <https://leitz.by/index.pl?act=SECTION§ion=sverla> (дата обращения: 10.03.2023).
11. Сверла // Дереворежущий инструмент FABA. URL: <https://faba78.ru/products/category/sverla> (дата обращения: 10.03.2023).
12. Сверла для присадочных станков // Деревообрабатывающий инструмент Freud-catalog. URL: <http://freud-catalog.ru/catalog/376/692/index.htm> (дата обращения: 10.03.2023).
13. Сверла для деревообработки // КАМИ – металлообрабатывающее, деревообрабатывающее оборудование, станки для мебельного производства, запасные части и инструмент. URL: <https://www.stanki.by/catalog/svyerla/> (дата обращения: 10.03.2023).
14. Сверла спиральные дереворежущие. Технические условия: ГОСТ 22057–76. М.: Изд-во стандартов, 1978. 21 с.
15. Сверла спиральные с цилиндрическим хвостовиком. Технические условия: ГОСТ 10902–77. М.: Изд-во стандартов, 1979. 23 с.
16. Пижурин А. А., Розенбит М. С. Исследования процессов деревообработки. М.: Лесная пром-сть, 1984. 232 с.

References

1. Belarusian industrial and trading concern of the timber, woodworking and pulp and paper industries. Available at: <http://www.bellesbumprom.by> (accessed 05.03.2023) (In Russian).
2. Cyra G. Studies on automatic control of wood routing using acoustic emission. *The United Graduate School of Agricultural Science*. 1997. Vol. 34 (3). P. 237–252.
3. Stuhmeier W. Fräsen von Spanplatten mit hochharten Schneidstoffen. *TU Braunschweig, F-B VDI 2*, 1989. Vol. 2 (181). P. 181–187 (In German).
4. Porankiewicz B. Tępienie się ostrzy i jakość przedmiotu obrabianego w skrawaniu płyt wiórowych. Poznań, Wyd. PTPN, 2003. 215 p. (In Polish).
5. Porankiewicz B. Zużycie ostrzy narzędzi przy frezowaniu płyt wiórowych. Poznan, Wyd. PTPN, 2000. 270 p. (In Polish).
6. Lemaste R. R. L., Lu L., Jackson S. The Use of Process Monitoring Techniques on CNC Wood Router. Part 2. Use of Vibration Accelerometer to Monitor Tool Wear and Workpiece Quality. *Forest Products Journal*, 2000, vol. 50 (9), pp. 59–64.
7. Davim J. P., Clemente V. V., Silva S. Drilling investigation of MDF (medium density fibreboard). *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 203, pp. 537–541.
8. Gaitonde V. N., Karnik S. R., Davim P. J. Taguchi Multiple-Performance Characteristics Optimization in Drilling of Medium Density Fibreboard (MDF) to Minimize Delamination Using Utility Concept. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 196 (1), pp. 73–78.
9. Drilling tools. Available at: https://www.leuco.com/RU/RU/Boring_Bits (accessed 22.03.2023) (In Russian).
10. Drills. Available at: <https://leitz.by/index.pl?act=SECTION§ion=sverla> (accessed 10.03.2023) (In Russian).
11. Drills. Available at: <https://faba78.ru/products/category/sverla> (accessed 10.03.2023) (In Russia).
12. Drill bits for filler machines. Available at: <http://freud-catalog.ru/catalog/376/692/index.htm> (accessed 10.03.2023) (In Russian).
13. Drills for woodworking. Available at: <https://www.stanki.by/catalog/svyerla/> (accessed 10.03.2023) (In Russian).

14. GOST 22057–76. Wood-cutting spiral drills. Specifications. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1978. 21 p. (In Russian).
15. GOST 10902–77. Spiral drills with a cylindrical shank. Specifications. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1979. 23 p. (In Russian).
16. Pizhurin A. A., Rozenblit M. S. *Issledovaniya protsessov derevoobrabotki* [Studies of woodworking processes]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 232 p. (In Russian).

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: t.a.mashoripova@mail.ru

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: t.a.mashoripova@mail.ru

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 16.03.2023

УДК 69.113.001

А. Н. Панов¹, Ж. А. Мрочек², Д. В. Куис³, Ю. И. Суша², Е. П. Орлова²¹ООО «Юрс-Русь», Российская Федерация²Белорусский национальный технический университет³Белорусский государственный технологический университет**ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ.
ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПРОДУКЦИИ
НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ**

В статье рассматривается актуальная проблема анализа и управления рисками в промышленности (химической, перерабатывающей, машиностроительной) для системного достижения глобальной конкурентоспособности. Рассмотрены проблемы результативности и эффективности существующих методологий и способы обеспечения оптимального соотношения «качество – цена» при проектировании, изготовлении и использовании продукции (техника, технология, эксплуатация). Риск – это массив взаимосвязей потенциальных ущербов и их вероятностей. Цель – разработка методологии рискориентированного проектирования, изготовления, эксплуатации, восстановления и последующей утилизации материалов, техники и технологий для обеспечения результативности, и эффективности деятельности в современных условиях. Предложены методология и способы управления рисками с оптимизацией затрат при создании техники и технологий повышения эффективности и конкурентоспособности производителей. На основе риск ориентированного проектно-процессного подхода разработаны: структура анализа рисков процесса; модель оптимальной связи значимости ущерба и вероятности событий с учетом изменения уровня знаний; модель оптимизации эффективности для организации производителя и для конечного потребителя в жизненном цикле продукции. Результаты проведенных исследований, апробации на практике позволили создать методическое обеспечение анализа, управления и оптимизации рисков для достижения результативности и эффективности организаций машиностроения в планетарной экономике.

Ключевые слова: риски, промышленная продукция, эффективность, события, вариация, бифурция, оптимизация, методология.

Для цитирования: Панов А. Н., Мрочек Ж. А., Куис Д. В., Суша Ю. И., Орлова Е. П. Пути повышения результативности и эффективности промышленности в глобальной экономике. Проектирование, изготовление и эксплуатация продукции на основе управления рисками // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 257–265. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-31.

A. N. Panov¹, J. A. Mrochek², D. V. Kuis³, Yu. I. Susha², K. P. Arlova²¹LLC “URS-Russia”²Belarusian National Technical University³Belarusian State Technological University**WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY AND EFFECTIVENESS
OF INDUSTRY IN THE GLOBAL ECONOMY. DESIGN, MANUFACTURE
AND OPERATION BASED ON RISK MANAGEMENT**

The article deals with the actual problem of risk analysis and management in industry (chemical, processing, mechanical engineering) for the systematic achievement of global competitiveness. The problems of effectiveness and efficiency of existing methodologies and ways to ensure an optimal quality-price ratio in the design, manufacture and use of products (equipment, technology, operation) are considered. Risk is an array of relationships between potential damages and their probabilities. The goal is to develop a methodology for risk-oriented design, manufacture, operation, restoration, and subsequent disposal of materials, equipment and technologies to ensure the effectiveness and efficiency of activities in modern conditions. The methodology and methods of risk management with cost optimization in the creation of equipment and technologies, improving the efficiency and competitiveness of manufacturers are proposed. Based on the risk-oriented project-process approach, the following: the structure of the process risk analysis; the model of the optimal relationship between the significance of damage and the probability of events, taking into account changes in the level of knowledge; the model of efficiency optimization for

the manufacturer's organization and for the end user in the product lifecycle. The results of the conducted research and testing in practice allowed us to create methodological support for the analysis, management and optimization of risks to achieve the effectiveness and efficiency of mechanical engineering organizations in the planetary economy.

Keywords: risks, industrial products, efficiency, events, variation, bifurcation, optimization, methodology.

For citation: Panov A. N., Mrochek J. A., Kuis D. V., Susha Yu. I., Arlova K. P. Ways to improve the efficiency and effectiveness of industry in the global economy. Design, manufacture and operation based on risk management. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 257–265. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-31 (In Russian).

Введение. Актуальной задачей современности [1–18] является повышение результативности (степень достижения запланированных целей) и эффективности (связь между результативностью и затраченными ресурсами). Определения терминов «результативность» и «эффективность» представлены согласно словарю ISO 9000. Это в полной мере относится к комплексам химических, керамических, стекольных, металлургических производств, итогом которых является получение материала в массе и объеме (волокна, ткани, профили, листы и т. д.). Несоответствия характеристик (дефектность, вариации свойств) материалов являются первоисточниками отказов продукции машиностроения. Следует отметить, что поскольку техника эксплуатируется в экстремальных условиях, таких как значительные колебания природных явлений (температура, влажность и т. п.) и кратковременные пиковые нагрузки, а также некоторые виды машин (например, сельхозтехника, оборудование для регионов крайнего Севера) используются в течение весьма короткого срока, то материальные последствия отказов объектов машиностроения из-за зарождения повреждений в применяемых материалах весьма значительны.

В глобальной экономике (в которой в настоящее время функционируют значимые для отраслей экономики организации) конкурирующие производители при создании, изготовлении и использовании материалов, техники и технологий пользуются практически единими интеллектуальными и материальными ресурсами. К ресурсам следует отнести как аналогичные материалы и оборудование, традиционные методологии и методики проектирования, изготовления и использования [1–9], так и технических специалистов, подготовленных на аналогичном (базовом) уровне учебных заведений. Следовательно, остается не так уж много шансов на успех у организаций, расположенных в странах, не имеющих фундаментального конкурентного преимущества – мощной ресурсной базы, а также достаточно емкого внутреннего рынка для потребления материалов и техники. Для обеспечения конкурентоспособности производителей материалов и машиностроительных организаций стран с указанными ограничениями основным ресурсом может являться

применение при проектировании, изготовлении и использовании техники современных методологий и способов управления рисками как при проектировании, подготовке производства, изготовлении, эксплуатации, восстановлении, так и утилизации материалов и изношенной техники [1–8]. В статье под термином «риск» понимается и предусматривается широко используемое (ISO 9000) определение – *воздействие неопределенности*. Иными словами, предполагается, что риск – это массив взаимосвязей потенциальных ущербов и их вероятностей.

Цель – разработка методологии рискоориентированного проектирования, изготовления, эксплуатации, восстановления и последующей утилизации материалов, техники и технологий для обеспечения результативности и эффективности деятельности в современных условиях.

Основная часть. В статье рассмотрены причины несоответствия (качества, надежности, целей производства, эффективности и т. д.) техники, выявленных в процессе ее подготовки и серийного производства. Традиционно критерием достижения качества продукции при проектировании и апробации технологических процессов предусматривается приемлемый процент брака [7–9]. Общепринято, что для одобрения технологического процесса, например в машиностроении, необходима проверка опытной партии продукции, оценка статистических результатов и достижение вероятности соответствия 99,7% [7–9]. Традиционно считается, что достижением соответствия продукции при контроле качества изготовления при серийном производстве является расположение полученной i -той величины характеристики в поле допуска показателя (размера и т. д.). Функция качества – это «контуры прямоугольного корыта» – стенками которого являются границы поля допуска (называют «допусковым мышлением»). Следует отметить, что указанное требование по оценке вероятности несоответствий на практике часто не выполняется, даже при изготовлении опытной партии продукции. Требования потребителей изменились [1–6] – основным критерием качества продукции уже не являются, хотя еще часто используются, особенно для бухгалтерского учета, результаты, полученные при

приемочном контроле (процент брака/дефектность), а также информация об отказах их эксплуатации (рис. 1).

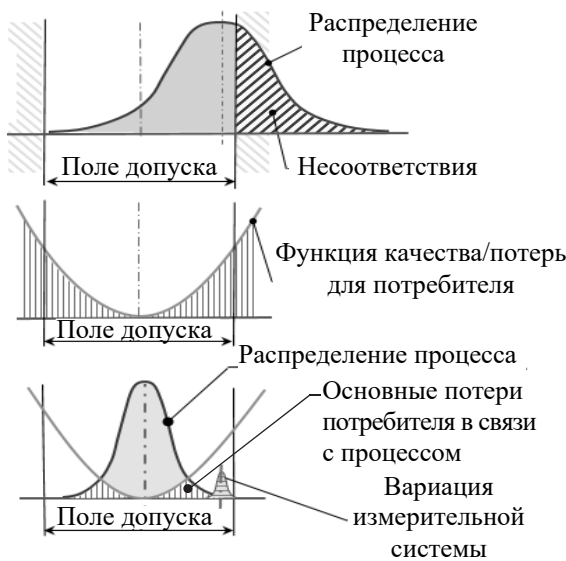


Рис. 1. Вероятностный подход к достижению соответствия процесса на основе оптимизации вариаций процесса тиражирования

В настоящее время при тиражировании продукции устанавливаются цели по качеству, такие как требуемая вероятность несоответствия продукции 50 ppm, 3 MIS IPTV 0,5 [1–9]. Требуемая вероятность соответствия должна быть на 3–5 порядков больше по сравнению с широко используемым подходом [7, 8]. Достичь указанной вероятности традиционными, классическими способами проектирования, апробации техники и технологии [8, 9] не представляется возможным. К причинам можно отнести то, что традиционное проектирование основывается на детерминированном подходе, например предполагается, что достаточно декларировать (при выборе/закупке оборудования) класс точности станка и вероятность соответствия будет достигнута. Считается, что достаточно осуществить оценку готовности производства один раз при изготовлении опытной партии, предполагая, что технологические, производственные процессы и объекты, участвующие в них (оборудование, инфраструктура, персонал и т. д.), практически неизменны в течение времени серийного производства, и это позволяет стабильно достигать соответствия продукции. В действительности, например, система СПИД (станок – приспособление – инструмент – деталь) на практике не является неизменной в течение времени (из-за деградации, внезапных отказов оборудования и т. д.), также не стабильны и поставщики материалов и комплектующих, что не позволяет с требуемой вероятностью достигать соответствия продукции качеству, которое было

оценено в момент ее постановки на производство. Фактически, указанным процессам, например той же системе СПИД, присущи риски событий, вариаций и бифуркаций [1–6]. В свою очередь, процессы обеспечения соответствия производства, например обслуживания и подготовки оборудования, оснастки, инструмента, средств измерения, подготовки помещений и кадров, с течением длительного времени также изменяются и им присущи риски недостижения целей. Примером может являться проверка оборудования на технологическую точность после ремонта – как иллюстрация допускового мышления. Соответственно, первоначальная (по окончании подготовки производства) оценка надежности/точности (ГОСТ 27.202–88) технологического процесса становится недостоверной во времени. Достижение упомянутых вероятностей несоответствия (например, 3 ppm для производства шин) – существенно удорожает производство. Возникает *фундаментальная проблема* (каким же образом выполнить противоречивые требования) – обеспечить малые вероятности несоответствия, традиционно описываемые параболической зависимостью (рис. 1), для достижения оптимального соотношения «цена – качество», в процессах жизненного цикла организации, при выполнении проектов. Угрозы неблагоприятных событий, избыточных вариаций и бифуркаций [1–6] не позволяют обеспечить экономически целесообразный объем рынка для продаж. Установлено, что для объективного измерения характеристик продукции, целью по качеству для которых являются малые вероятности (такие, как ppm 50), следует создавать иную, а не использовать традиционную измерительную систему (рис. 1), адекватную распределению характеристик процесса. Указанное не может быть достигнуто традиционным метрологическим обеспечением производства (например, выбором средств измерений по ГОСТ 8.050–73 или ГОСТ 8.051–81 и их периодической поверкой).

В то же время необходимо различать чрезмерные, приемлемые и пренебрежимые риски, которые могут возникать при реализации процессов деятельности (рис. 2). Целью управления рисками и, соответственно, оптимальным решением является установление процессов организации-производителя, а также процессов использования техники в зоне приемлемых рисков. Указанное замечание является новой планетарной парадигмой результативного и эффективного создания и использования техники [1–6].

Установлено, что решение задачи повышения результативности и эффективности возможно путем анализа, оптимизации и управления рисками воздействия на процесс и его результаты (например, реализация проекта по созданию производства).



Рис. 2. Случайные процессы человеческой деятельности и области пренебрежимых, приемлемых и чрезмерных рисков несоответствия (вещество, энергия, информация) и уязвимостей (природная, техногенная и социальная среды)

Для этого случая методология и способы должны позволять организации в заданных ограничениях достигать поставленных целей с приемлемыми рисками (рис. 2) [1–9]. Предложено [2] анализ рисков событий, вариаций и бифуркаций осуществлять (рис. 3) по трем этапам для сценариев угроз, уязвимостей и ущерба.

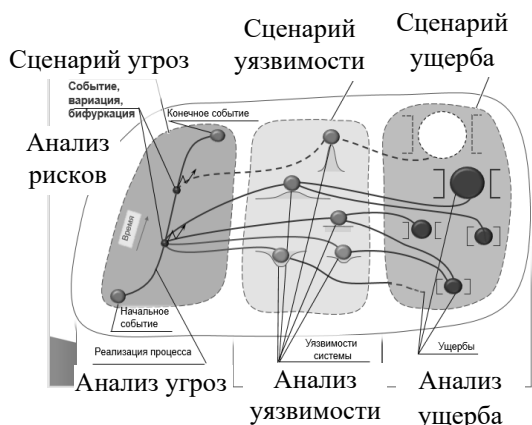


Рис. 3. Представление структуры анализа рисков процесса на основе рискориентированного проектно-процессного подхода

Установлено, что процессы организации, например, такие как постановка на производство материалов, техники и принятие конструкторско-технологических решений, следует определять на базе методологии рискориентированного проектно-процессного подхода [2–6] и основывать на построении соответствующих сценариев рисков для достижения приемлемых ущербов.

Известно, что результативность и эффективность сложных систем, таких как материалы, машины и технологии, может существенно повыситься путем использования высших технологических укладов [2]. Создание такой продукции требует инновационного, системного подхода и

методов управления производством для достижения приемлемой вероятности несоответствия (отказы, невыполнение характеристик и т. д.). В настоящее время продукция, например, со встроенным программным обеспечением и безлюдными технологиями требуют новой культуры проектирования, изготовления и эксплуатации наряду с необходимостью изменения законодательства, а также сопровождаются новыми видами и сценариями угроз и уязвимостей.

Организации – лидеры производства материалов и техники широко внедряют и используют встроенные программные средства [1–9], а организации-производители в СНГ теряют конкурентное преимущество из-за этого фактора. Использование программного обеспечения является не только способом повышения эффективности, но и фактором уязвимости продукции и возможных рисков: событий, вариаций и бифуркаций (рис. 3). Соответственно, необходимы новые методики управления взаимосвязанными рисками: материалов, техники, программного обеспечения [2].

Анализ [2] показывает, что методология управления рисками стартовала от точечной однокритериальной оценки (вероятность – «годная» и «несоответствующая продукция») и поэтапно развивалась до стратегии приоритизации в виде гиперболической зависимости «вероятность – ущерб» [1–9]. Зависимость, позволяющая оптимизировать затраты на достижение соответствия, описывается функцией, близкой к гиперболической. Характеристики техники, которые значительно влияют на достижение целей заинтересованных сторон (потребителя и т. д.), должны достигаться с большой вероятностью, а малозначимые характеристики, соответственно, могут и с меньшей. В этом случае можно оптимизировать затраты при создании типа технического объекта в условиях компромиссов (рис. 4).

Для процессов тиражирования продукции целями в области управления рисками является приемлемость вариации тиражирования – изменяющаяся по ширине область вдоль гиперболы (рис. 4). Вариация для значимых ущербов при тиражировании должна быть существенно меньше, чем для менее приоритетных характеристик. Таким образом, при рискориентированном подходе достигается оптимальное соотношение «качество – цена» (рис. 1). Семейство гипербол [2] (рис. 4) идентифицирует уровень (например, определяемый технологическим укладом) технического решения и, соответственно, исходя из целей и заданного уровня приемлемости ущерба (рис. 3, 4), определяется выбор технического решения при проектировании. Зона экстремальных ущербов (рис. 4) определяет область особого внимания на редкие события (нештатные ситуации: проектные, запроектные и гипотетические аварии) [1–6],

которые характерны как для производства, так и при использовании техники.

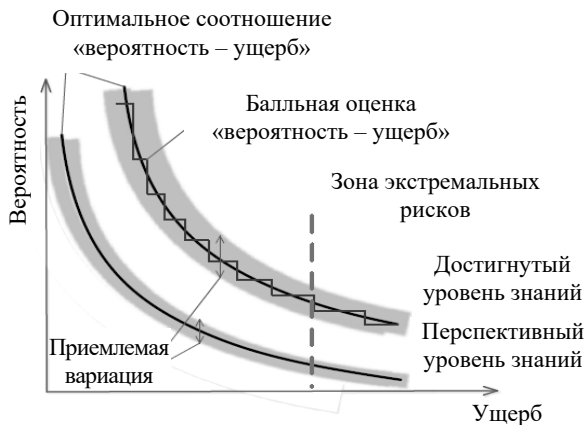


Рис. 4. Модель оптимальной связи значимости ущерба и вероятности событий с учетом изменения уровня знаний при использовании риск ориентированного подхода

На практике при проектировании для удобства нелинейную гиперболическую функцию обратной аппроксимацией преобразуют в ступенчатую балльную шкалу (рис. 4). В дополнение к номинальному значению и полю допуска шкала приоритетов позволяет ввести в конструкторско-технологическую документацию идентификатор значимости последствий несоответствий (балл значимости в овале) [6]. Можно эффективно управлять созданием, изготовлением и использованием техники на основе научно-технических знаний причинно-следственных связей: последствия отказа техники; отказ техники; причина; первопричина; источник отказа.

Предложенная модель (рис. 4) позволяет гармонизировать критерии для достижения соответствия установленным требованиям по качеству, надежности и безопасности сложных технических систем и принимать адекватные рискам решения в жизненном цикле продукции. Например, обосновывать критерии финансирования научных исследований, опытно-конструкторских, опытно-технологических работ, выбора оборудования, поставщиков материалов, деталей, комплектующих.

На практике, при реализации риск ориентированного мышления, актуальнейшей является проблема оптимизации затрат [1–9], поскольку наряду с традиционными затратами на испытание, контроль и неизбежными потерями возникает новая ресурсная составляющая – затраты на управление рисками. Предложена соответствующая трехкомпонентная гиперболическая модель [3–5], позволяющая решать на практике требуемую задачу. Модель позволяет достигать минимальной величины в себестоимости продукции оптимальным соотношением трех компонентов

затрат: мониторинг достижения соответствия; компенсация из-за несоответствий; управление рисками.

В этом случае решается задача потребителя машиностроительной продукции – получить максимальную интегральную прибыль и разницу между получаемым доходом при использовании продукции и затратами на ее приобретение, эксплуатацию и утилизацию («стоимость владения»). Следует поставлять продукцию, которая будет иметь как конкурентоспособные цену/себестоимость, что определяет первоначальные затраты на приобретение, так и приемлемую для потребителя «стоимость владения». В свою очередь, за счет увеличения объема продаж производитель получит больший доход. Таким образом, для устойчивого успеха организации-производителю следует увеличить долю рынка путем привлечения большего количества потребителей и увеличения по сравнению с конкурентами интегральной прибыли – разности между получаемым доходом и суммой затрат на первоначальное приобретение и эксплуатацию продукции. В этой ситуации могут возникнуть противоречия, которые кажутся непреодолимыми.

Поэтому следует рассмотреть возможные варианты оптимизации одновременного обеспечения эффективности как для потребителя, так и производителя. Для простоты рассмотрим случай производства однотипной продукции (рис. 5).

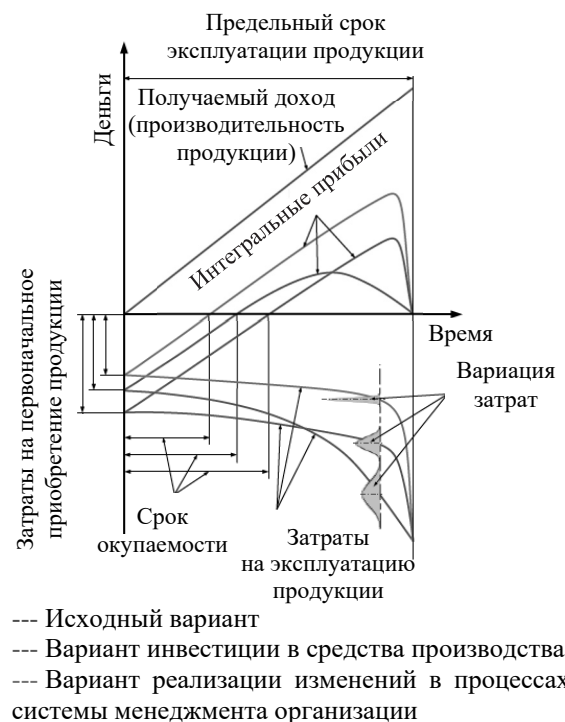


Рис. 5. Модель оптимизации эффективности использования техники для организации-производителя и конечного потребителя в жизненном цикле продукции

К однотипной относится продукция, если установлены единые требования потребителя к получаемому доходу (производительность техники); одинаковые технические и технологические решения для конструкции и процессов изготовления; единый тип/серийность производства; одинаковый предельный срок эксплуатации техники (законодательное ограничение, экономическая целесообразность, моральный срок обновления и др.). При этом в затраты на эксплуатацию техники следует включать: расходные материалы, топливо, смазку; затраты на обслуживание, ремонт и восстановление; простои из-за невозможности эксплуатации (из-за обслуживания, ремонта и др.).

Проанализируем варианты стратегии обеспечения результативности и эффективности для заинтересованных сторон – производителя и пользователя при создании и использовании техники (рис. 5):

– «исходный вариант» – использование методологии «допускового мышления» и способов традиционной разработки и постановки продукции на производство;

– «вариант инвестиции в средства производства» – использование методологии «допускового мышления», способов традиционной разработки и постановки продукции на производство. Для повышения качества продукции предусмотрено использование оборудования (средств производства), более совершенного, соответственно, по большей цене. В результате ожидается, что продукция при производстве получится лучшего качества;

– «реализация изменений в процессах системы менеджмента организации» – использование в жизненном цикле продукции от маркетинга до утилизации рискориентированного проектно-процессного подхода [1–18].

Анализ показывает, что за счет использования рискориентированного подхода, т. е. управления по приоритетам на основе сценариев угроз, уязвимостей, ущербов (рис. 3), при создании типа материала/конструкции и соответствующем управлении вариацией тиражирования (рис. 4), а также применении технологических укладов/уровней знаний [2] (рис. 4) появляется возможность создания продукции с меньшими затратами, обеспечивающей большие интегральные прибыли для потребителя. Соответственно, этот подход позволит увеличить доход производителя путем роста объема востребованной продукции (рис. 5).

В развитии определений терминов, существующих в нормативных документах ISO/IEC Guide 2:2004 ISO 9000, ГОСТ 27.002–89, впервые предложено создать пригодные рискориентированному подходу фракталы: «стандарт»,

«стандартизация», «качество» и «надежность». Для этого сформулированы фундаментальные, глобальные изменения определений терминов:

– стандарт – документ, обеспечивающий оптимальным образом упорядоченную повторяющуюся деятельность и ее результаты для достижения приемлемых рисков заинтересованными сторонами;

– стандартизация – деятельность, направленная на оптимальную упорядоченность процессов и их результатов для достижения приемлемых рисков заинтересованными сторонами;

– качество – степень соответствия набора присущих характеристик объекта требованиям, достигнутая при приемлемом риске для заинтересованных сторон в жизненном цикле объекта;

– надежность – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования при приемлемом риске для заинтересованных сторон в жизненном цикле объекта.

При этом в конструкторско-технологической документации кроме номинальной величины и поля допуска устанавливается приоритетность характеристики. Т. е. в технической документации возле каждой характеристики (геометрической, свойств материалов и т. д.) определяется символ значимости последствий несоответствий из-за указанной характеристики для заинтересованных сторон. Например, записывается в геометрическом овале балл значимости последствий от 1 до 10 (наибольший интегральный ущерб в случае отказа техники). Таким образом, в рамках жизненного цикла техники (начиная от установления требований, проектирования и заканчивая утилизацией) можно результативно и эффективно управлять вероятностью достижения соответствия характеристик в зависимости от идентифицированного риска.

Указанное позволяет получать соответствующие аттракторы для достижения рискориентированного соответствия требованиям продукции, процессов и добиваться конкурентоспособной экономической эффективности в планетарной экономике.

Разработанные [1–9] методология и модели использованы при создании инновационных государственных стандартов для производства материалов и техники, в СТБ 16949, СТБ 2298, СТБ В15.004 и методики достижения результативности и эффективности на основе управления рисками в цепях поставок СТБ 1505, СТБ 1506, СТБ 2450, СТБ 2484, СТБ 2582.

Заключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Существующая традиционная методология и способы создания и использования материалов и техники не позволяют достигать малых вероятностей ее несоответствия (отказов) и обеспечивать конкурентоспособность для производителя – себестоимостью, а для потребителя – «стоимостью ее владения».

2. Установлено, что организации промышленности, расположенные в странах, не обладающих большим ресурсным потенциалом и внутренним спросом, практически не могут выжить в глобальной планетарной конкуренции при использовании допускового либо вероятностного подходов при создании промышленной продукции. Поэтому одним из эффективных инновационных путей повышения результативности и эффективности машиностроения страны является

использование рискориентированного проектно-процессного подхода.

3. Результаты проведенных исследований, апробации на практике позволили создать методическое обеспечение анализа, управления и оптимизации рисков для достижения результативности и эффективности организаций в планетарной экономике.

4. Результаты использованы при разработке государственных и межгосударственных стандартов на продукцию и методов обеспечения качества, надежности и безопасности материалов, технологий и техники на основе управления рисками для применения в промышленности; при подготовке кадров; при реализации проектов по созданию новых производств, а также при совершенствовании деятельности организаций-производителей материалов и техники для обеспечения конкурентоспособности на планетарных рынках.

Список литературы

1. Основы системы менеджмента качества машиностроительного предприятия / В. И. Арбузов [и др.]. Минск: Технопринт, 2000. 280 с.
2. Махутов Н. А., Панов А. Н. Безопасность России. Правовые, социально-экономические научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность. М.: Знание, 2018. 1016 с.
3. Панов А. Н. Как победить в конкурентной борьбе. Гармоничная система качества – основа эффективного менеджмента организации. М.: Стандарты и качество, 2003. 272 с.
4. Горбачевич М. И., Панов А. Н., Минюкович С. М. Проектирование транспортных средств: нагруженность, повреждение, ресурс: монография. Минск: Технопринт, 2005. 264 с.
5. Технологическое обеспечение машиностроительного производства: учеб. пособие / Ж. А. Мрочек [и др.]. Минск: РИВШ, 2021. 560 с.
6. Панов А. Н. Риск-ориентированное проектирование в машиностроении // Стандарты и качество. 2021. № 8. С. 106–108.
7. Решетов Д. Н., Иванов А. С., Фадеев В. В. Надежность машин: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1988. 238 с.
8. Проников А. С. Параметрическая надежность машин. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 520 с.
9. Надежность и эффективность в технике: справочник. В 10 т. Т. 7. Качество и надежность в производстве / под ред. И. В. Апполонова. М.: Машиностроение, 1989. 280 с.
10. Махутов Н. А., Панов А. Н. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Научные основы техногенной безопасности. М.: Знание, 2015. 936 с.
11. Осмола И. И., Шкадрцов И. В. Научно-методические основы проектирования. Системное обеспечение приемлемых рисков в автотракторосельхозмашиностроении: монография / А. Н. Панов [и др.]. Минск: БГАТУ, 2009. 482 с.
12. Математические модели и методики обеспечения приемлемых рисков информационно-измерительных и управляющих систем транзитных газопроводов / В. В. Алексеев [и др.]. СПб.: ЛЭТИ, 2016. 160 с.
13. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1 / под ред. А. М. Дальского [и др.]. М.: Машиностроение, 2001. 912 с.
14. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / под ред. А. М. Дальского [и др.]. М.: Машиностроение, 2001. 944 с.
15. Якушев А. И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения: учеб. для вузов. М.: Машиностроение. 1986. 352 с.
16. Машиностроение: энциклопедия. В 40 т. Т. IV-3. Надежность машин / под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 2001. 592 с.
17. Надежность и эффективность в технике: справочник. В 10 т. Т. 8. Эксплуатация и ремонт / под ред. В. И. Кузнецова, Е. Ю. Барзиловича. М.: Машиностроение, 1990. 320 с.
18. Надежность и эффективность в технике: справочник. В 10 т. Т. 10. Справочные данные по условиям эксплуатации и характеристикам надежности / под ред. В. И. Кузнецова. М.: Машиностроение, 1990. 336 с.

References

1. Arbuzov V. I., Mrochek J. A., Panov A. N., Harton V. L. *Osnovy sistemy menedzhmenta kachestva mashinostroitel'nogo predpriyatiya* [Fundamentals of the quality management system of a machine-building enterprise]. Minsk, Technoprint Publ., 2000. 280 p. (In Russian).
2. Makhutov N. A., Panov A. N. *Pravovyye, sotsial'no-ekonomicheskiye nauchno-tekhnicheskiye aspekty. Tekhnogennaya, tekhnologicheskaya i tekhnosfernaya bezopasnost'* [Security of Russia. Legal, socio-economic scientific and technical aspects. Technogenic, technological and technosphere safety]. Moscow, Znaniye Publ., 2018, 1016 p. (In Russian).
3. Panov A. N. *Kak pobedit' v konkurentnoy bor'be. Garmonichnaya sistema kachestva – osnova effektivnogo menedzhmenta organizatsii* [How to win in a competitive struggle. A harmonious quality system is the basis of an organization's effective management]. Moscow, Standarty i kachestvo Publ., 2003. 272 p. (In Russian).
4. Gorbatshevich M. I., Panov A. N., Minyukovich S. M. *Proyektirovaniye transportnykh sredstv: nagruzhennost', povrezhdeniye, resurs* [Vehicle design: loading, damage, resource]. Minsk, Technoprint Publ., 2005. 264 p. (In Russian).
5. Logvin V. A., Mrochek J. A., Bankovskaya E. V., Sheptunov S. A., Panov A. N. *Tekhnologicheskoye obespecheniye mashinostroitel'nogo proizvodstva* [Technological support of machine-building production]. Minsk, RIVSH Publ., 2021. 560 p. (In Russian).
6. Panov A. N. Risk-oriented design in mechanical engineering. *Standarty i kachestvo* [Standards and quality], 2021, no. 8, pp. 106–108 (In Russian).
7. Reshetov D. N., Ivanov A. S., Fadeev V. V. *Nadezhnost' mashin* [Reliability of machines]. Moscow, Higher School Publ., 1988. 238 p. (In Russian).
8. Pronikov A. S. *Parametricheskaya nadezhnost' mashin* [Parametric reliability of machines]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2002. 520 p. (In Russian).
9. *Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike. V 10 tomakh. Tom 7. Kachestvo i nadezhnost' v proizvodstve* [Reliability and efficiency in engineering. In 10 vol. Vol. 7. Quality and reliability in production]. Edit. by I. V. Appolonov. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1989. 280 p. (In Russian).
10. Makhutov N. A., Panov A. N. *Bezopasnost' Rossii. Pravovyye, sotsial'no-ekonomicheskiye i nauchno-tekhnicheskiye aspekty. Nauchnyye osnovy tekhnogennoy bezopasnosti* [Security of Russia. Legal, socio-economic, scientific and technical aspects. Scientific foundations of technogenic safety]. Moscow, Znaniye Publ., 2015. 936 p. (In Russian).
11. Osmola I. I., Shkadretsov I. V. *Nauchno-metodicheskiye osnovy proyektirovaniya. Sistemnoye obespecheniye priyemlykh riskov v avtotraktorosel'kh mashinostroyenii* [Scientific and methodological foundations of design. System support of acceptable risks in automotive agricultural machinery]. Minsk, BGATU Publ., 2009. 482 p. (In Russian).
12. Alekseev V. V., Gavrilenko S. I., Panov A. N., Stolyarov V. E. *Matematicheskiye modeli i metodiki obespecheniya priyemlykh riskov informatsionno-izmeritel'nykh i upravlyayushchikh sistem tranzitnykh gazoprovodov* [Mathematical models and methods for ensuring acceptable risks of information-measuring and control systems of transit gas pipelines]. St. Petersburg, LETI Publ., 2016. 160 p. (In Russian).
13. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya. V 2 tomakh. Tom 1* [Handbook of a machine-building technologist. In 2 vol. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2001. 912 p. (In Russian).
14. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya. V 2 tomakh. Tom 2* [Handbook of a machine-building technologist. In 2 vol. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2001. 944 p. (In Russian).
15. Yakushev A. I. *Vzaimozamenyayemost', standartizatsiya i tekhnicheskiye izmereniya* [Interchangeability, standardization and technical measurements]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1986. 352 p. (In Russian).
16. *Nadezhnost' mashin. V 40 tomakh. Tom IV-3* [Reliability of machines. In 40 vol. Vol. IV-3]. Edit. by V. V. Klyuev. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2001. 592 p. (In Russian).
17. *Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike. V 10 tomakh. Tom 8. Ekspluatatsiya i remont* [Reliability and efficiency in engineering. In 10 vol. Vol. 8. Operation i remont]. Edit. by V. I. Kuznetsov, E. Y. Barzilovich. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1989. 320 p. (In Russian).
18. *Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike. V 10 tomakh. Tom 10. Spravochnyye dannyye po usloviyam ekspluatatsii i kharakteristikam nadezhnosti* [Reliability and efficiency in engineering. In 10 vol. Vol. 10. Reference data on operating conditions and reliability characteristics]. Edit. by V. I. Kuznetsov. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1990. 336 p. (In Russian).

Информация об авторах

Панов Александр Николаевич – кандидат технических наук, главный эксперт ООО «Юрс-Русь» (199106, г. Санкт Петербург, 22-я линия Васильевского острова, 3/1-421, Российская Федерация). E-mail: a.panov@tut.by

Мрочек Жорж Адамович – доктор технических наук, профессор кафедры «Вакуумная и компрессорная техника». Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, Республика Беларусь). E-mail: vikt@bntu.by

Куис Дмитрий Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой материаловедения и проектирования технических систем. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dmitrykuis@mail.ru

Суша Юлия Ивановна – специалист кафедры «Вакуумная и компрессорная техника». Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, Республика Беларусь). E-mail: Susha@bntu.by

Орлова Екатерина Петровна – старший преподаватель кафедры «Вакуумная и компрессорная техника». Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, Республика Беларусь). E-mail: orlova_e@tut.by

Information about the authors

Panov Alexander Nikolaevich – PhD (Engineering), Chief Expert of LLC “URS-Rusia” (3/1-421, 22nd line of Vasilyevsky Island, 199106, St. Petersburg, Russian Federation). E-mail: a.panov@tut.by

Mrochek Jorj Adamowicz – DSc (Engineering), Professor, the Department “Vacuum and Compression Technology”. Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vikt@bntu.by

Kuis Dmitry Valerievich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Material Science and Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dmitrykuis@mail.ru

Susha Yulia Ivanovna – specialist, the Department “Vacuum and Compression Technology”. Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Susha@bntu.by

Orlova Katerina Petrovna – senior lecturer the Department “Vacuum and Compression Technology”. Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: orlova_e@tut.by

Поступила 16.03.2023

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ ЛЕСАМИ, ЛЕСОУСТРОЙСТВО И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ.....	5
Севко О. А., Коцан В. В., Мусский А. А. Влияние внутривидовой и межвидовой конкуренции на таксационные показатели древесных пород в сложном древостое	5
ЛЕСНАЯ ЭКОЛОГИЯ И ЛЕСОВОДСТВО.....	14
Ерошкина И. Ф. Динамика типологической структуры сосновой формации	14
Москальчук Л. Н. Анализ санитарного и экологического состояния лесных экосистем Старобинского лесхоза.....	22
ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЕ И ЛЕСОРАЗВЕДЕНИЕ.....	28
Носников В. В., Граник А. М., Юрени А. В., Селищева О. А. Изменение качественных параметров торфяных субстратов в зависимости от технологических приемов и условий комплексов по выращиванию контейнеризированных семян.....	28
Носников В. В., Босовец М. М., Селищева О. А., Баркун М. И. Влияние интенсивности светодиодного освещения на особенности развития семян сосны и ели с закрытой корневой системой	36
Носников В. В., Овсей А. А., Мишина В. Э., Потапова А. В. Оценка приемов повышения грунтовой всхожести желудей и выхода посадочного материала дуба черешчатого с закрытой корневой системой.....	46
Соколовский И. В., Беспалый А. А. Почвы насаждений ясеня обыкновенного (<i>Fraxinus excelsior</i>) на Белорусском Полесье, их строение, состав и свойства	54
Alam M., Nosnikov V. V. Improving <i>Pinus pinea</i> plantation success with hydrogel.....	60
ЛЕСОЗАЩИТА И САДОВО-ПАРКОВОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО.....	67
Блох В. Г., Звягинцев В. Б. Биологическая эффективность фунгицидов против болезней древесных растений при их введении методом стволовых инъекций	67
Рогинский А. С., Анацко Ю. В., Буга С. В. Оценка затрат на замену конского каштана обыкновенного в зеленых насаждениях Минска древесными породами, устойчивыми к повреждению инвазивными минерами	76
Сазонов А. А., Бабуль Д. А., Пацукевич П. В. Повышение устойчивости дубрав выборочными санитарными рубками: проблемы и способы их преодоления	87
Синчук Н. В., Буга С. В. Характер поврежденности листовых пластинок тополя берлинского (<i>Populus × berolinensis</i>) личинками тополевой моли-пестрянки (<i>Phyllonorycter populifoliella</i>) в городах Беларуси	100
ТУРИЗМ И ЛЕСОХОТНИЧЬЕ ХОЗЯЙСТВО.....	110
Андреева В. Л. Аналитический обзор понятия «образовательный туризм»	110
Бессараб Д. А. К вопросу о возможности использования потенциала особо охраняемых территорий для развития экологического туризма.....	120
ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС. ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ.....	126
Короленя Р. О., Бедная Ю. А. Проверка гипотезы о законе распределения времени движения сортиментоваза при перевозке древесины.....	126

Короленя Р. О., Барташевич Е. И. Основные результаты моделирования работы сортировочного конвейера на маршрутах перевозки древесины	134
ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ	143
Романенко В. В., Невзорова А. Б. Ресурсосберегающая технология изготовления составных деревянных шпал	143
Игнатович Л. В., Лосик Е. А. Конструктивные и технологические особенности древесных композиционных материалов из шпона при производстве столярно-строительных изделий и конструктивных элементов мебели (обзор)	152
Гордиевич Е. И., Игнатович Л. В. Исследование органолептических показателей качества мягкой мебели и оценка их весомости.....	166
Шелемет Н. Ю., Чуйков А. С. Особенности эксплуатации, внутренняя конструкция и материалы, применяемые для облегчения спортивно-беговых лыж (обзор)	173
Чуйков А. С., Куневич В. О., Рудак О. Г., Сиваков В. В. Анимация подвижных элементов мебели в условиях виртуальной среды	183
Рудак О. Г. Современные представления о технологии начального прогрева древесины в ненасыщенной среде (обзор).....	193
Дупанов С. А., Леонович О. К. Возрастная и видовая дифференциация натурального мориленого дуба	204
Жарская Я. П., Федосенко И. Г. Получение топливных гранул с высокими качественными характеристиками из щепы низкого качества	210
Bazhelka I., Kanavalava A., Radkevich L. Evaluation of compositions for bleaching wood affected by wood-coloring and mold fungi.....	217
ОБЩЕИНЖЕНЕРНЫЕ ВОПРОСЫ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА	224
Домненкова А. В., Домненков В. А., Чернушевич Г. А. Прогнозная оценка лесного фонда Ветковского спецлесхоза и выхода его территории из зон радиоактивного загрязнения	224
Войтеховский Б. В., Гриневич С. А., Аникеенко А. Ф. Энергоёмкость процесса фрезерования кромок ламинированных древесностружечных плит наклонными режущими элементами	232
Пищов М. Н., Бельский С. Е., Царук Ф. Ф. Фрактографический анализ высокочастотных усталостных изломов	238
Гриневич С. А., Бабич Д. П., Макаревич А. В. Оценка упрощенного метода определения режимов пиления	245
Машорипова Т. А., Аникеенко А. Ф. Исследование влияния режимов сверления ламинированных древесно-стружечных плит на мощность резания на этапе отсеивания малозначимых переменных	251
Панов А. Н., Мрочек Ж. А., Куис Д. В., Суша Ю. И., Орлова Е. П. Пути повышения результативности и эффективности промышленности в глобальной экономике. Проектирование, изготовление и эксплуатация продукции на основе управления рисками.....	257

CONTENTS

FOREST MANAGEMENT, FOREST INVENTORY AND INFORMATION SYSTEMS IN FORESTRY	5
Sevko O. A., Kotsan V. V., Musskiy A. A. The impact of intraspecific and interspecific competition on the taxation indicators of tree species in a complex tree stand.....	5
FOREST ECOLOGY AND SILVICULTURE	14
Eroshkina I. F. Dynamics of the typological structure of the pine formation	14
Maskalchuk L. M. Analysis of the sanitary and ecological state of the forest ecosystems of the Starobinsky forestry.....	22
FOREST REGENERATION AND FOREST GROWING.....	28
Nosnikov V. V., Granik A. M., Yurenya A. V., Selishcheva O. A. Changes in the quality parameters of peat substrates depending on the technological methods and conditions of complexes for growing containerized seedlings	28
Nosnikov V. V., Bosovets M. M., Selishcheva O. A., Barkun M. I. Influence of LED light intensity on the development features of containerized pine and spruce seedlings	36
Nosnikov V. V., Ovsey A. A., Mishina V. E., Potapova A. V. Evaluation of the methods of increasing the ground germination of acorns and the yield of container planting material of English oak	46
Sokolovskiy I. V., Bepalyy A. A. Soils of stands of common ash (<i>Fraxinus excelsior</i>) in the Belarusian Polesie, their structure, composition and properties	54
Alam M., Nosnikov V. V. Improving <i>Pinus pinea</i> plantation success with hydrogel.....	60
FOREST PROTECTION AND LANDSCAPING	67
Blokh V. G., Zviagintsev V. B. Biological effectiveness of fungicides against woody plants diseases when introduced by stem injection method	67
Roginsky A., Anatsko Yu., Buga S. Estimated costs for replacing the common horse chestnut in the green areas of Minsk city with trees resistant to damage by invasive miner pests	76
Sazonov A. A., Babul' D. A., Patsukevich P. V. Increasing the resistance of the oak forests by selective sanitary logging: problems and ways to overcome them	87
Sinchuk N., Buga S. The nature of the damage to the leaf blades of Berlin poplar (<i>Populus × berlinensis</i>) by larvae of the poplar moth (<i>Phyllonorycter populifoliella</i>) in the cities of Belarus.....	100
TOURISM AND FOREST HUNTING	110
Andreeva V. L. Analytical review of the concept of “educational tourism”	110
Bessarab D. A. On the question of the possibility of using the potential specially protected areas for the development of ecological tourism	120
TIMBER PROCESSING COMPLEX. TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL QUESTIONS	126
Korolenia R. O., Bednaya Yu. A. Hypothesis testing on the distribution law of travel time of a timber truck during timber transportation	126
Korolenia R. O., Bartashevich E. I. The main results of modeling log truck operations on the timber transportation routes	134

WOODWORKING INDUSTRY	143
Romanenko V. V., Neuzorava A. B. Resource-saving technology for manufacturing composite wooden sleepers	143
Ignatovich L. V., Losik E. A. Structural and technological features of wood composite materials from veneer in the production of joinery and construction products and structural furniture elements (review)	152
Gordiyevich E. I., Ignatovich L. V. Study of organoleptic quality indicators of upholstered furniture and assessment of their weight	166
Shelemt N. Yu., Chuikov A. S. Features of operation, internal structure and materials used to lighten sports-cross-country skis (review)	173
Chuikov A. S., Kunevich V. O., Rudak O. G., Sivakov V. V. Animation of moving furniture elements in conditions virtual environment	183
Rudak O. G. Current understanding of the technology of initial heating of wood in an unsaturated environment (review)	193
Dupanov S. A., Leonovich O. K. Age and species differentiation of natural bog oak	204
Zharskaya Ya. P., Fedosenko I. G. Production fuel granules with high quality characteristics from low-quality wood	210
Bazhelka I., Kanavalava A., Radkevich L. Evaluation of compositions for bleaching wood affected by wood-coloring and mold fungi	217
ALL-ENGINEERING QUESTIONS OF TIMBER PROCESSING COMPLEX	224
Domnenkova A. V., Domnenkov V. A., Chernushevich G. A. Predictive assessment of the forest fund of the Vetkovskiy forestry and the exit of its territory from the zones of radioactive contamination	224
Voitechovsky B. V., Grinevich S. A., Anikeenko A. F. Energy intensity of the laminated chipboard edges milling process with inclined cutting elements	232
Pishchov M. N., Belsky S. E., Tsaruk F. F. Fractographic analysis of high-frequency fatigue fractures	238
Grinevich S. A., Babich D. P., Makarevich A. V. Evaluation of a simplified method for sawing regimes determining	245
Mashoripova T. A., Anikeenko A. F. Studies of the influence of drilling modes of laminated chipboard on cutting power at the stage of screening out insignificant variables	251
Panov A. N., Mrochek J. A., Kuis D. V., Susha Yu. I., Arlova K. P. Ways to improve the efficiency and effectiveness of industry in the global economy. Design, manufacture and operation based on risk management	257

Редактор *Т. Е. Самсанович*
Компьютерная верстка *Е. В. Ильченко, П. М. Никитина, В. А. Маркушевская*
Корректор *Т. Е. Самсанович*

Подписано в печать 14.07.2023. Формат 60×84^{1/8}.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 31,4. Уч.-изд. л. 33,7.
Тираж 75 экз. Заказ 288.

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.