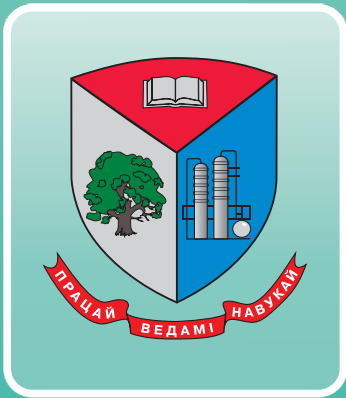


ISSN 2519-402X



ТРУДЫ БГТУ

Научный журнал



Серия 1

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО,
ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ
И ПЕРЕРАБОТКА
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ РЕСУРСОВ

№ 1 (264) 2023 год

Рубрики номера:

Лесная экология и лесоводство

Лесовосстановление и лесоразведение

Лесозащита и садово-парковое строительство

Туризм и лесохотничье хозяйство

Лесопромышленный комплекс.

Транспортно-технологические вопросы

Деревообрабатывающая промышленность



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**

№ 1 (264) 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;
Водопьянов П. А., член-корреспондент НАН Беларуси, доктор философских наук, профессор, Республика Беларусь;
Новикова И. В., доктор экономических наук, профессор, Республика Беларусь;
Наркевич И. И., доктор физико-математических наук, профессор, Республика Беларусь;
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 (264) 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;
Saevich 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 551.583;581.5

М. В. Ермохин, Я. К. Игнатъев, Л. И. Старикова

Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича НАН Беларуси

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ДИНАМИКУ РАДИАЛЬНОГО ПРИРОСТА БУКА ЛЕСНОГО И ПСЕВДОТСУГИ МЕНЗИСА

В публикации приведены результаты исследования влияния климатических факторов на радиальный прирост бука лесного (*Fagus sylvatica* L.) и псевдотсуги Мензиса (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) на территории Беларуси. Установлено, что деревья обеих пород повреждаются крайне низкими зимними температурами (около -40°C). Снижение радиального прироста на 40–50% у бука также связано с летними засухами текущего и предыдущего годов. Сухие и теплые июль – сентябрь вызывают обильное плодоношение на следующий год и снижение прироста, а засухи в июне приводят к снижению прироста уже в текущем году. Теплые зимы и март положительно сказываются на радиальном приросте псевдотсуги, кроме того, она чувствительна к июньским засухам. Установленные зависимости показывают, что в современных климатических условиях возможно ограниченное использование обеих пород при создании лесных культур на части территории Беларуси. Расселение бука в южные и юго-восточные регионы столкнется с негативным влиянием засух, а в северо-восточном направлении – с поздними весенними заморозками и высокой вероятностью повреждения низкими зимними температурами. Выращивание псевдотсуги возможно на большей, чем для бука, части территории Беларуси. Однако, как и бук, она подвержена негативному влиянию летних засух и низких зимних температур.

Ключевые слова: ширина годичного кольца, бук, псевдотсуга, климат, состояние.

Для цитирования: Ермохин М. В., Игнатъев Я. К., Старикова Л. И. Влияние климатических факторов на динамику радиального прироста бука лесного и псевдотсуги Мензиса // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 5–13. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-01.

M. V. Yermokhin, Ya. K. Ignatiev, L. I. Starikova

V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Science of Belarus

IMPACT OF CLIMATIC FACTORS ON TREE-RING DYNAMICS OF EUROPEAN BEECH AND DOUGLAS FIR

The results of a dendrochronological investigation of the climate impact on tree-ring dynamics of European beech (*Fagus sylvatica* L.) and Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) in Belarus are present in the article. Both species are damaged by extremely low winter temperatures (about -40°C). Decreases in radial growth by 40–50% for beech are also associated with summer droughts of the current or previous years. Dry and warm July-September causes abundant fruiting for the next year and a tree grows decrease, and droughts in June lead to a decrease in growth already this year. Warm winters and March have a positive effect on the tree-ring width of Douglas fir; in addition, it is sensitive to June droughts. The established correlations show the possible use of both species in the current climatic conditions when creating forest plantations in the part of the territory of Belarus. Beech distribution in

the southern and southeastern regions will face the negative impact of droughts, and in the northeastern direction – with late spring frosts and a high probability of damage by low winter temperatures. Cultivation of Douglas fir is possible on a larger territory of Belarus than for beech. However, like beech, it is subject to the negative influence of summer droughts and low winter temperatures.

Key words: tree-ring width, European beech, Douglas fir, climate, state.

For citation: Yermokhin M. V., Ignatiev Ya. K., Starikova L. I. Impact of climatic factors on tree-ring dynamics of European beech and Douglas fir. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 5–13. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-01 (In Russian).

Введение. В связи с климатическими изменениями специалисты лесного хозяйства Беларуси все чаще начинают обращать внимание на различные виды интродуцированных древесных пород, которые могут быть адаптированы к условиям прогнозируемых параметров климата. Многолетний опыт интродукции белорусских лесоводов позволил в опытных условиях вырастить на территории Беларуси отдельные деревья и насаждения лиственницы европейской, лиственницы сибирской, сосны веймутовой, псевдотсуги Мензиса, бука лесного и др. Были разработаны рекомендации по посадке и уходу за ними [1, 2].

Одной из пород, которые рассматриваются для использования в лесном хозяйстве, является бук лесной (*Fagus sylvatica* L.). Его ареал охватывает почти всю Западную Европу и часть Восточной. Однако до Беларуси он не доходит около сотни километров (рис. 1). В Беларуси бук лесной встречается единичными деревьями или небольшими аллеями в парках и старых усадьбах в западной части страны. В Индурском лесничестве Гродненского лесхоза сохранился небольшой по площади участок чистых лесных культур, созданных в 1910-х годах.

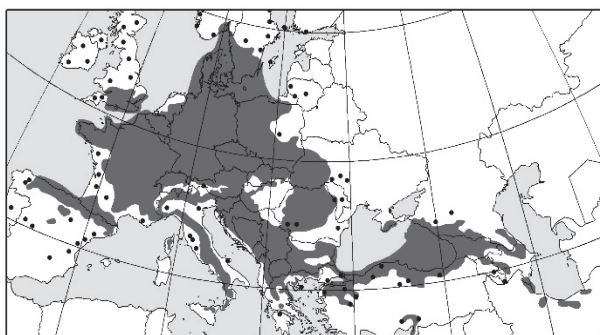


Рис. 1. Ареал бука лесного (*Fagus sylvatica* L.) [3]

Исследования, проведенные в Европе, показали, что бук лесной повреждается низкими зимними температурами и поздними заморозками, а также летними засухами. При этом низкие зимние температуры могут приводить к полному уничтожению посадок. В Польше на восточной границе ареала бука, наиболее близ-

кой к территории Беларуси, распространение его ограничивается низкими зимними температурами в северной части, а летними засухами – в южной [4, 5].

Еще одной из интродуцированных древесных пород, использование которой в озеленении Беларуси насчитывает около 100 лет, является псевдотсуга Мензиса (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). Естественный ареал псевдотсуги расположен в западной части Северной Америки, где она формирует крупные лесные массивы. При этом высота деревьев может достигать 100 м, что делает ее одним из наиболее крупных деревьев в мире. Выделяют две основные разновидности псевдотсуги: *Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii* и *Pseudotsuga menziesii* var. *glauca*, а последнюю делят еще на две под-разновидности [6]. *Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* отличается сизым цветом хвои, растет в горных районах и не достигает очень крупных размеров. При этом она является более морозоустойчивой, что делает ее привлекательной для озеленения во многих регионах мира. Однако для создания лесных плантаций в Европе широко использовалась и используется *Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii* [7].

Одними из старейших на территории Беларуси и сохранившихся в удовлетворительном состоянии насаждений являются лесные культуры псевдотсуги Мензиса (*Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii*) в Прилукской лесной даче, созданные в начале 1930-х годов. В возрасте 35 лет запас древостоя составлял 340–420 м³/га [8]. Фитопатологическое обследование насаждения в 1970-х годах не выявило опасных болезней, и культуры находились в хорошем состоянии [9]. Исследования, проведенные здесь в 1990-х годах, показали, что псевдотсуга является одной из наиболее продуктивных и устойчивых древесных пород к грибным болезням и неблагоприятным факторам внешней среды [10]. Однако, как и аборигенная ель европейская, псевдотсуга сильно пострадала от продолжительных летних засух начала 1990-х годов вследствие нарушения водного режима и недостаточной влагообеспеченности. В ослабленных засухой

культурах усилилась вредоносная деятельность корневой губки и стволовых вредителей и началось куртинное отмирание деревьев. Однако исследования состояния древостоев псевдотсуги в Европе показали, что она быстро восстанавливается после стресса, вызванного засухами, и в целом меньше повреждается болезнями и вредителями, чем аборигенные сосна и ель [11].

Потепление климата, которое наблюдается и на территории Беларуси [12], создает благоприятные условия для произрастания более теплолюбивых видов деревьев. Поэтому в рамках нашей работы мы решили исследовать влияние климатических факторов на обе породы (бук и псевдотсугу) с тем, чтобы оценить возможные перспективы их использования для адаптации лесного хозяйства Беларуси к изменению климата.

Объекты и методы исследования. Исследования проведены в двух старейших насаждениях бука лесного и псевдотсуги Мензиса на территории Беларуси (рис. 2).

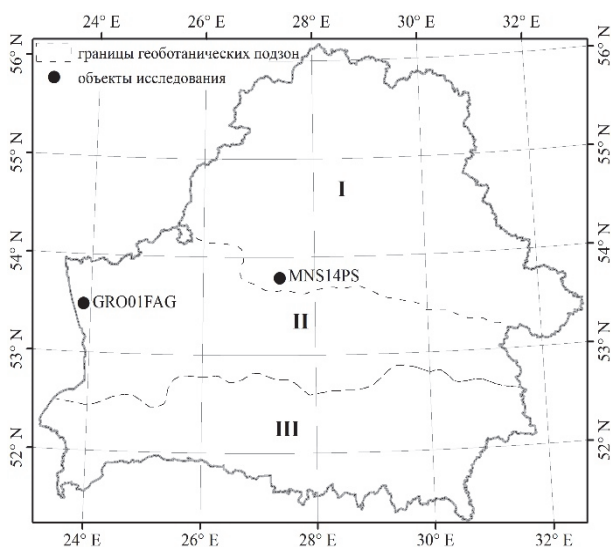


Рис. 2. Схема размещения объектов исследования (геоботанические подзоны: I – дубово-темнохвойных лесов; II – грабово-дубово-темнохвойных лесов; III – широколиственно-сосновых лесов [13])

Насаждение бука лесного (GRO01FAG) расположено в выделе 4 квартала 158 Индурского лесничества Гродненского лесхоза. Согласно материалам лесоустройства (2019 г.), запас древостоя составляет $290 \text{ м}^3/\text{га}$ при полноте 0,6.

Чистые лесные культуры созданы в 1910-х годах в условиях кисличного типа леса (тип условий местопроизрастания С2). В настоящее время насаждение возрастом 110 лет сохранилось на площади 0,2 га.

Насаждение псевдотсуги Мензиса (MNS14PS) расположено на территории бывшей Прилуцкой лесной дачи нынешнего Боровлянского спец-

лесхоза (выдел 2 квартала 166 Ратомского лесничества). Условия произрастания соответствуют кисличной серии типов леса (тип условий местопроизрастания С2Д2). Согласно материалам лесоустройства (2017 г.), состав древостоя 6ЛЖ4Е + Л + Д + ДК + СБ, запас – $550 \text{ м}^3/\text{га}$ при полноте 0,5. Лесные культуры псевдотсуги и лиственницы сибирской созданы в начале 1930-х годов [8]. Псевдотсуга выращена из семян из штата Орегон, лиственница сибирская – из аллей и парков в окрестностях Прилуцкой лесной дачи. До этого три года на вырубке выращивались овес и рожь. Обработка почвы проводилась осенью конным плугом ПП-28 бороздами (ширина 30, глубина 15–18 см). Густота посадки культур – $6670 \text{ шт}/\text{га}$ ($1,5 \times 1,0 \text{ м}$). Посадка производилась сеянцами-двухлетками под меч Колосова, затем в течение трех лет проводилось рыхление почвы и прополка сорняков, а также окашивание до возраста смыкания крон. В последующие годы проводились рубки ухода слабой интенсивности (убирались сухие и усыхающие деревья). К настоящему времени лиственница почти полностью выпала из состава, а значительную долю в древостое стала занимать ель, появившаяся естественным путем.

В каждом насаждении у деревьев были отобраны керны древесины (по два у каждого дерева) для дендрохронологического анализа. Стандартная процедура обычно включает отбор кернов у 20–25 деревьев. Однако в данном случае оказалось сложно выбрать деревья бука без повреждений ствола, так как почти все деревья в насаждении многоствольные. Поэтому для анализа были использованы образцы только 14 деревьев. Дальнейший анализ древесно-кольцевых хронологий показал, что эта многоствольность связана с повреждением молодых деревьев сильными морозами зимы 1939/1940 гг.

Измерение ширины годовых колец выполняли по отсканированному изображению (1200 dpi) в программном обеспечении ArcGIS с точностью 0,01 мм. На основании дендрохронологического анализа кернов для каждого дерева получали усредненный ряд.

Перекрестное датирование, выявление ложных и выпавших колец проведены с использованием кросскорреляционного анализа [14]. Стандартизация изменчивости радиального прироста проводилась для каждого дерева с дальнейшим усреднением индексов по пробной площади и построением стандартизированной древесно-кольцевой хронологии (ДКХ). Для сглаживания возрастных кривых использованы экспоненциальная кривая или сплайн-функция с заданным окном сплайна и уровнем подавления дисперсии 50%.

Краткая характеристика древесно-кольцевых хронологий

Номер ДКХ	Количество деревьев, шт.	Диапазон, лет	Тип хронологии*	Коэффициент чувствительности	Среднеквадратическое отклонение	Автокорреляция 1-го порядка	Доли дисперсии, объясненные климатом, %
GRO01FAG	14	1926–2021	std	0,20	0,19	0,26	32,7
			res	0,23	0,19	–	36,1
MNS14PS	22	1939–2021	std	0,17	0,19	0,43	34,4
			res	0,20	0,18	–	32,0

* std – стандартизированная хронология; res – остаточная хронология.

Для оценки степени воздействия климатических факторов на погодичную изменчивость ширины годичных колец использован коэффициент чувствительности, введенный в дендрохронологию А. Е. Дуглассом [15].

Перекрестное датирование серий годичных колец выполнено в программе COFECNA 6.06P, расчеты кривых для элиминирования возрастных трендов, индексов прироста и авторегрессионное моделирование – в программе ARSTAN40c, построение функций отклика радиального прироста на климатические факторы – в программе RESPO [16].

Для оценки влияния климатических факторов на радиальный прирост бука лесного были использованы данные по метеостанции «Гродно» за 1946–2020 гг., а для псевдотсуги Мензиса – данные по метеостанции «Минск» за 1945–2020 гг.

Результаты исследования. Бук лесной. Протяженность ДКХ бука – 96 лет (рис. 3).

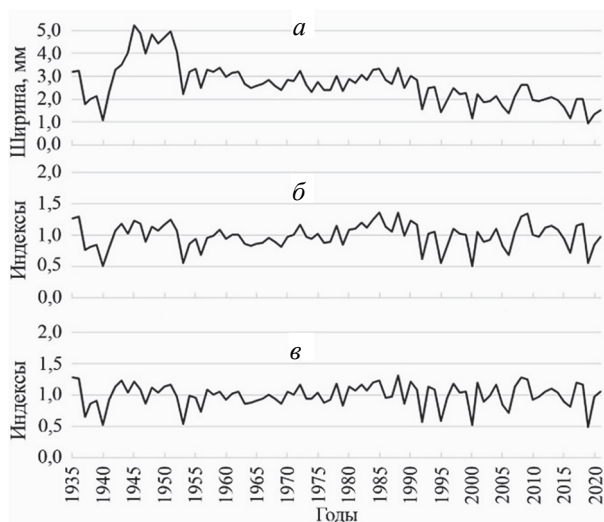


Рис. 3. Абсолютная (а), стандартизированная (б) и остаточная (в) древесно-кольцевые хронологии бука лесного (GRO01FAG)

Коэффициент чувствительности стандартизированной ДКХ составляет 0,2 (таблица), что сопоставимо с чувствительностью ели европейской (*Picea abies*) на территории Беларуси

из аналогичных условий произрастания [17]. При этом хронология отличается и низкой автокорреляцией первого порядка (0,26).

В стандартизированной и остаточной древесно-кольцевой хронологии бука выделяется шесть лет, в которые радиальный прирост резко опускался на 40–50% от нормы (1,0): 1940, 1953, 1992, 1995, 2000, 2019.

Наиболее сильное падение радиального прироста отмечено в 1940 г. и связано с крайне низкими зимними температурами воздуха. Минимальные температуры воздуха в январе в Беларуси опускались ниже -40°C . В результате молодые деревья бука оказались сильно повреждены. Об этом свидетельствует многостольность и кривые стволы большинства деревьев на уровне 1–2 м. При этом еще одна из самых холодных зим (1970 г.) не отразилась на радиальном приросте бука, несмотря на минимальную температуру в феврале $-36,3^{\circ}\text{C}$.

Остальные сильные снижения радиального прироста, которые стали чаще наблюдаться с 1990-х годов, связаны с летними засухами текущего или предыдущего годов. Кроме того, значимые отрицательные коэффициенты корреляции и функции отклика отмечены нами для сентября предыдущего года. Именно в годы с сухим и теплым периодом с июля по сентябрь у бука массово закладываются генеративные почки и наблюдается обильное плодоношение на следующий год [18]. Соответственно у деревьев остается ограниченное количество питательных веществ на формирование годичных колец. Так, на фоне обильного плодоношения в 2019 г. произошло резкое снижение радиального прироста.

С 1940 г. в регионе произрастания бука не было настолько суровых зим, которые могли привести к повреждению деревьев. Поэтому отсутствуют значимые коэффициенты корреляции и функции отклика древесно-кольцевой хронологии на зимние температуры воздуха (рис. 4).

Результаты корреляционного и регрессионного анализа подтверждают и результатами исследований в основном ареале бука [5].

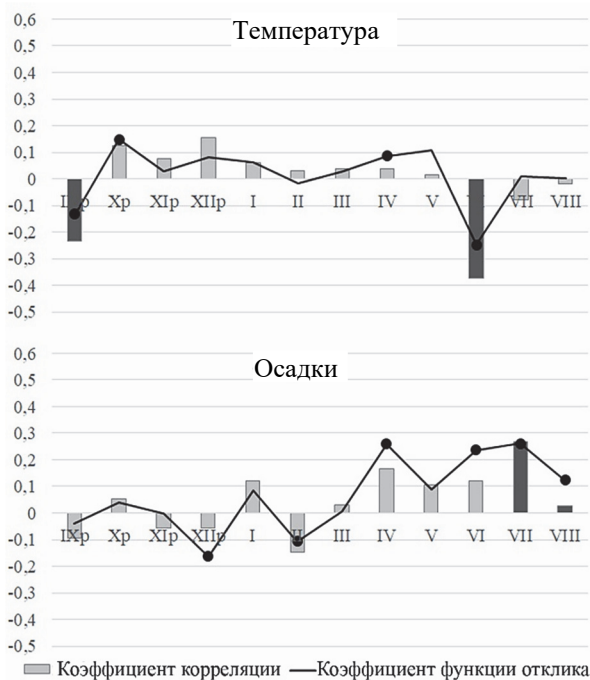


Рис. 4. Коэффициенты корреляции и функции отклика радиального прироста бука лесного со средними температурами воздуха и суммами осадков (коэффициенты, значимые при $p < 0,05$, выделены темным цветом и маркерами)

В течение текущего года бук наиболее чувствителен к июньским засухам, когда идет основной прирост древесины. В июне значимый отрицательный коэффициент корреляции радиального прироста с температурами воздуха составляет $-0,37$, а коэффициент функции отклика $-0,25$. При этом положительные коэффициенты функции отклика установлены для осадков апреля, июня, июля и августа. Т. е. для роста деревьев бука крайне важным является режим осадков в течение всего вегетационного сезона.

В целом функция отклика на климатические факторы для бука лесного объясняет только 36,1% изменчивости радиального прироста в остаточной хронологии. Это подтверждает, что климатические условия на западе Гродненской области достаточно благоприятны для его произрастания.

Потепление климата на территории Беларуси происходит по засушливому сценарию: температуры воздуха растут, а количество осадков остается практически без изменений [12]. Поэтому существует высокая вероятность угнетения деревьев бука при дальнейшем увеличении продолжительности и интенсивности летних засух, с одной стороны, и создания благоприятных условий для массового плодоношения, с другой. При этом, даже с учетом большей континентальности климата, чем на восточной границе ареала бука, сохраняется вероятность его повреждения как

поздними весенними заморозками, так и низкими зимними температурами. Ограничение расширения ареала бука в северо-восточном направлении, связанное с засухами и поздними весенними заморозками, значение которых для бука растет в последние годы, отмечено и европейскими исследователями [5].

Псевдотсуга Мензиса. Протяженность ДКХ псевдотсуги Мензиса составляет 83 года (рис. 5). Как и бук лесной, псевдотсуга очень сильно пострадала от морозов 1939/1940 гг. Практически все молодые растения в эту зиму были повреждены, однако смогли выжить за счет замены центрального побега боковыми. Многие деревья и сегодня имеют два ствола, либо следы удаления одного из стволов, либо искривление ствола на высоте около 1 м, а радиальный прирост в этот год снизился более чем на 60%.

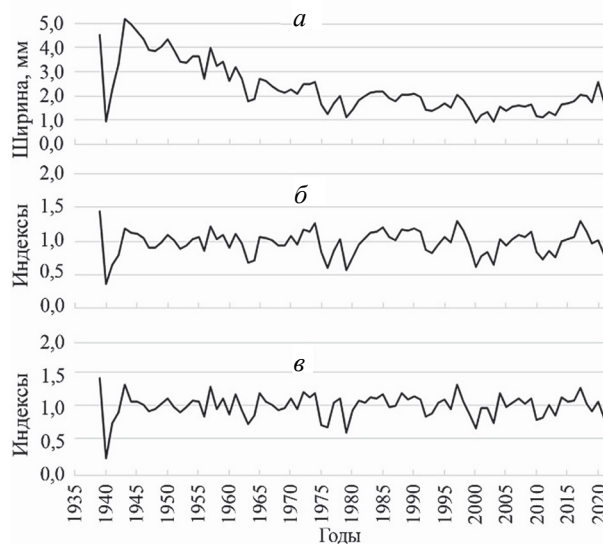


Рис. 5. Абсолютная (а), стандартизованная (б) и остаточная (в) древесно-кольцевые хронологии бука лесного (MNS14PS)

Коэффициент чувствительности стандартизованной ДКХ составляет 0,17 (см. таблицу), что ниже чувствительности ели европейской [17], но выше или сопоставимо с чувствительностью сосны обыкновенной из центральных районов Беларуси в аналогичных условиях произрастания [19]. При этом автокорреляция первого порядка (0,43) в 1,5 раза выше, чем у ДКХ бука.

Функция отклика радиального прироста на климат у псевдотсуги Мензиса объясняет всего 32,0% изменчивости радиального прироста в остаточной хронологии. И, как и для бука, это свидетельствует о благоприятных для нее климатических условиях. Частично низкая дисперсия, объясненная климатом, может быть связана с проведением рубок ухода и санитарно-оздоровительных мероприятий в насаждении на протяжении последних 30 лет.

Как и у всех ранее исследованных хвойных древесных пород (сосны обыкновенной, ели европейской, пихты белой) на территории Беларуси [17, 19, 20], в ДКХ псевдотсуги выражена устойчивая положительная корреляция с температурами зимних месяцев и марта (рис. 6).

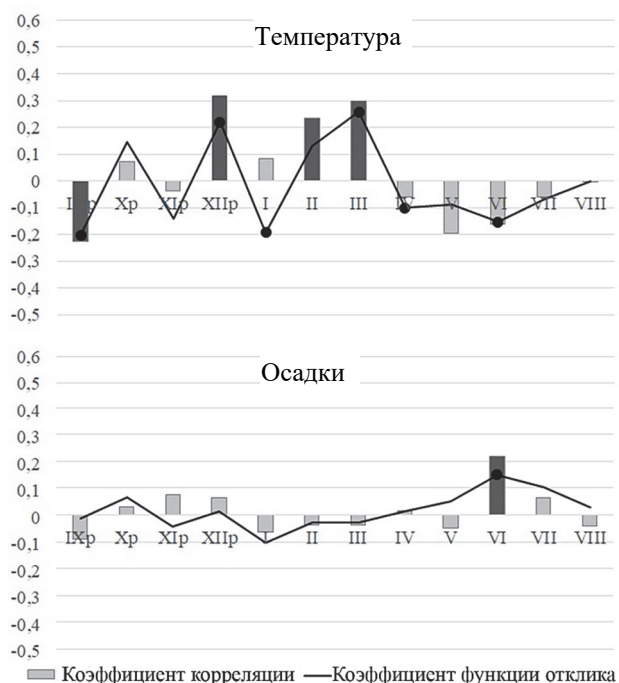


Рис. 6. Коэффициенты корреляции и функции отклика радиального прироста псевдотсуги Мензиса со средними температурами воздуха и суммами осадков (коэффициенты, значимые при $p < 0,05$, выделены темным цветом и маркерами)

Основная причина лежит в особенностях физиологии хвойных пород. Вечнозеленые растения даже в зимний период могут осуществлять фотосинтез, что обеспечивает частичное восстановление углеводов, затраченных на дыхание. Так, по некоторым исследованиям фотосинтез у деревьев ели отмечается до температуры -7°C [21], у сосны – до -6°C [22, 23]. Соответственно, теплые зимы и продолжительные оттепели способствуют увеличению интенсивности как дыхания, так и фотосинтеза у хвойных пород, который в определенной степени компенсирует расходы на дыхание. Это приводит к сохранению запасов углеводов на вегетационный сезон и более интенсивному приросту древесины в его первой половине.

Значимый отрицательный коэффициент функции отклика отмечен для температур июня, в этот же период отмечена положительная корреляция и положительный коэффициент функции отклика радиального прироста с осадками. Исследования камбиальной активности псевдотсуги, проведенные в данном насаждении еще в 1965–

1967 гг. Ю. Д. Сироткиным и Л. М. Сероглазовой [24], показали, что в течение июня формировалось до 33,3% радиального прироста, а в июле, когда на прирост частично влияют погодные условия июня, – до 31,9%. Т. е. гидротермические условия именно этого периода вносят значительный вклад в формирование прироста. В целом летние засухи оказывают меньшее влияние на псевдотсугу, чем на ель европейскую, у которой высокая корреляционная связь (выше, чем у псевдотсуги) с гидротермическим режимом не только июня, но и июля [17]. Аналогичные результаты получены при оценке влияния климатических факторов на радиальный прирост псевдотсуги Мензиса и ели европейской в Словении [25]. В то же время авторы отмечают, что роль летних осадков в формировании радиального прироста псевдотсуги увеличилась в последние десятилетия, что может стать для нее лимитирующим фактором в будущем.

Заключение. Результаты проведенного исследования позволяют сделать несколько основных выводов:

1. Бук лесной и псевдотсуга Мензиса повреждаются крайне низкими зимними температурами (около -40°C), что приводит к нарушению камбиальной активности, замене центрального побега боковыми и возможной массовой гибели растений, как это было в 1940 г.

2. Для роста деревьев бука крайне важным является режим осадков в течение всего вегетационного сезона. Снижения радиального прироста на 40–50%, участившиеся с 1990-х годов, связаны с летними засухами текущего или предыдущего годов. В годы с сухими и теплыми июлем – сентябрем у бука массово закладываются генеративные почки и, соответственно, происходит обильное плодоношение на следующий год, что приводит к снижению прироста. Засухи в июне, когда идет основной прирост древесины, приводят к снижению прироста уже в текущем году.

3. Большая континентальность климата в западной части Беларуси, чем на восточной границе ареала бука, повышает вероятность его повреждения как поздними весенними заморозками, так и низкими зимними температурами.

4. Радиальный прирост псевдотсуги Мензиса отличается устойчивой положительной корреляцией с температурами зимних месяцев и марта. Сохранение тренда на зимнее потепление будет благоприятно сказываться на ее состоянии и росте.

5. Псевдотсуга Мензиса чувствительна к летним засухам. Однако они оказывают на нее меньшее влияние, чем на аборигенную ель европейскую.

Установленные зависимости радиального прироста бука лесного и псевдотсуги Мензиса от климатических факторов показывают их возможное,

но ограниченное использование при создании лесных культур. Расселение бука за пределы Гродненской области в более южные и юго-восточные регионы столкнется с негативным влиянием засух, а в северо-восточном направлении – с поздними весенними заморозками и высокой вероятностью повреждения низкими зимними температурами. Аналогичная тенденция наблюдается и для аборигенного граба, который более морозо- и особенно засухоустойчив, чем бук, но в Беларуси проходит его естественная северо-восточная граница.

Выращивание псевдотсуги возможно на большей, чем для бука, части территории Беларуси. Однако, как и бук, она подвержена негативному влиянию летних засух и поздних весенних заморозков.

При этом следует учитывать, что обе исследованные древесные породы являются чужеродными для флоры Беларуси и имеют инвазивный

потенциал в некоторых условиях произрастания [4, 7]. Соответственно, с целью сохранения биологического разнообразия белорусских лесов их использование в лесном хозяйстве должно быть ограничено. С нашей точки зрения, адаптация лесного хозяйства к изменению климата должна происходить за счет трансформации практики лесоразведения и лесовосстановления, проведения рубок ухода. В частности, следует более широко использовать аборигенные широколиственные породы деревьев. Например, тот же дуб черешчатый отличается гораздо более высокой морозо- и засухоустойчивостью, а также более широкой амплитудой почвенно-грунтовых условий.

Работа выполнена в рамках задания 10.1.04 НИР «Влияние региональных особенностей изменения климата на устойчивость лесов Беларуси» ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 г.

Список литературы

1. Нестерович Н. Д. Интродукционные районы и древесные растения для зеленого строительства в Белорусской ССР: справочник. Минск: Наука и техника, 1981. 111 с.
2. Федорук А. Т. Опыт интродукции древесных лиственных растений в Белоруссии. Минск: Университетское, 1985. 160 с.
3. Caudullo G., Welk E., San-Miguel-Ayanz J. Chorological maps for the main European woody species // Data in Brief. 2017. No. 12. P. 662–666.
4. Winter matters: Sensitivity to winter climate and cold events increases towards the cold distribution margin of European beech (*Fagus sylvatica* L.) / R. Weigel [et al.] // Journal of Biogeography. 2018. No 45. P. 2779–2790.
5. Lowest drought sensitivity and decreasing growth synchrony towards the dry distribution margin of European beech / L. Muffler [et al.] // Journal of Biogeography. 2020. Vol. 47, no. 9. P. 1910–1921.
6. Lavender D. P., Hermann R. K. Douglas-fir: The Genus *Pseudotsuga*. Corvallis, OR, USA: Forest Research Publications Office, 2014. 353 p.
7. Spiecker H., Lindner M., Schuler J. Douglas-fir – an option for Europe. Joensuu: European Forest Institute, 2019. 121 p.
8. Сироткин Ю. Д., Сероглазова Л. М. Псевдотсуга в культурах Белоруссии // Лесоведение и лесное хозяйство: респ. межведомств. сб. 1970. № 3. С. 86–93.
9. Сироткин Ю. Д., Федоров Н. И., Федоров В. Н. Грибные болезни интродуцированных хвойных пород в лесных культурах Минского лесхоза // Лесоведение и лесное хозяйство: респ. межведомств. сб. 1975. № 10. С. 133–139.
10. Особенности формирования и фитопатологическое состояние культур хвойных интродуцентов в лесном заказнике «Прилуцкий» / Н. И. Федоров [и др.] // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хозяйство. 2000. Вып. VIII. С. 81–90.
11. Frank M. T., Rzepecki A., Werner W. Non-native Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) in Central Europe: Ecology, performance and nature conservation // Forest Ecology and Management. 2022. Vol. 506. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119956.
12. Логинов В. Ф., Лысенко С. А., Мельник В. И. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования. 2-е изд. Минск: Энциклопедикс, 2020. 264 с.
13. Гельтман В. С. Географический и типологический анализ лесной растительности Белоруссии. Минск: Наука и техника, 1982. 326 с.
14. Holmes R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // Tree-Ring Bull. 1983. No. 44. P. 69–75.
15. Fritts H. C. Tree-ring analysis: tool for water resource // Trans. Amer. Geolog. Union. 1969. Vol. 50. P. 22–29.
16. Holmes R. L. Dendrochronology program library. Users manual. Tucson, Arizona, 1984. 51 p.
17. Ермохин М. В. Влияние климатических факторов на радиальный прирост ели (*Picea abies* (L.) Karst.) в Беларуси // Ботаника (исследования): сб. науч. тр. 2008. Вып. 35. С. 34–45.
18. Молотков П. И. Буковые леса и хозяйство в них. М.: Лесная пром-сть, 1966. 224 с.

19. Ермохин М. В. Дендрохронологическое районирование сосны обыкновенной в Беларуси // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. биол. наук. 2020. Т. 65, № 4. С. 441–453.
20. Динамика и состояние популяции пихты белой в урочище «Тисовик» / М. В. Ермохин [и др.] // Беловежская пуща. Исследования. 2016. Вып. 14. С. 57–81.
21. Field and controlled environment measurements show strong seasonal acclimation in photosynthesis and respiration potential in boreal Scots pine / P. Kolari [et al.] // *Frontiers Plant Sci.* 2014. Vol. 5. Art. 717. DOI: 10.3389/fpls.2014.00717.
22. Pisek A., Winkler E. Assimilationsvermögen und Respiration der Fichte (*Picea excelsa* Link) in verschiedener Höhenlage und der Zirbe (*Pinus cembra* L.) an der alpinen Waldgrenze // *Planta.* 1958. Vol. 51, no. 4. P. 518–543.
23. Wintertime photosynthesis and water uptake in a boreal forest / S. Sevanto [et al.] // *Tree Physiol.* 2006. Vol. 26, no. 6. P. 749–757.
24. Сироткин Ю. Д., Сероглазова Л. М. Сезонный прирост древесины лжетсуги тиссолистной // Лесоведение и лесное хозяйство: респ. межведомств. сб. 1969. № 2. С. 138–143.
25. Levanic T., Štraus H. Effects of Climate on Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) Growth Southeast of the European Alps // *Plants.* 2022. Vol. 11. DOI: 10.3390/plants11121571.

References

1. Nesterovich N. D. *Introduktsionnyye rayony i drevesnyye rasteniya dlya zelenogo stroitel'stva v Belorusskoy SSR: spravochnik* [Introductory areas and woody plants for green building in the Byelorussian SSR: a handbook]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1981. 111 p. (In Russian).
2. Fedoruk A. T. *Opyt introduktsii drevesnykh listvennykh rasteniy v Belorussii* [Experience of introduction of woody deciduous plants in Belarus]. Minsk, Universitetskoye Publ., 1985. 160 p. (In Russian).
3. Caudullo G., Welk E., San-Miguel-Ayanz J. Chorological maps for the main European woody species. *Data in Brief*, 2017, no. 12, pp. 662–666.
4. Weigel R., Muffler L., Klisz M., Kreyling J., van der Maaten-Theunissen M., Wilmking M., van der Maaten E. Winter matters: Sensitivity to winter climate and cold events increases towards the cold distribution margin of European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Journal of Biogeography*, 2018, no. 45, pp. 2779–2790.
5. Muffler L., Weigel R., Hackett-Pain A., Klisz M., van der Maaten E., Wilmking M., Kreyling J., van der Maaten-Theunissen M. Lowest drought sensitivity and decreasing growth synchrony towards the dry distribution margin of European beech. *Journal of Biogeography*, 2020, vol. 47, no. 9, pp. 1910–1921.
6. Lavender D. P., Hermann R. K. Douglas-fir: The Genus *Pseudotsuga*. Corvallis, OR, USA, Forest Research Publications Office, 2014. 353 p.
7. Spiecker H., Lindner M., Schuler J. Douglas-fir – an option for Europe. Joensuu: European Forest Institute, 2019. 121 p.
8. Sirotkin Yu. D., Seroglazova L. M. Douglas-fir in the cultures of Belarus. *Lesovedeniye i lesnoye khozyaystvo: respublikanskiy mezhvedomstvennyy sbornik* [Forest science and forestry: republican interdepartmental digest], 1970, no. 3, pp. 86–93 (In Russian).
9. Sirotkin Yu. D., Fedorov N. I., Fedorov V. N. Fungal diseases of introduced conifers in forest cultures of Minsk forestry. *Lesovedeniye i lesnoye khozyaystvo: respublikanskiy mezhvedomstvennyy sbornik* [Forest science and forestry: republican interdepartmental digest], 1975, no. 10, pp. 133–139 (In Russian).
10. Fedorov N. I., Gvozdev V. K., Khvasko A. V., Volkovich A. P., Yarmolovich V. A. Features of the formation and phytopathological state of cultures of coniferous introduced species in the forest reserve “Priluksky”. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU]. Series I, Forestry, 2000, issue VIII, pp. 81–90 (In Russian).
11. Frank M. T., Rzepecki A., Werner W. Non-native Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) in Central Europe: Ecology, performance and nature conservation. *Forest Ecology and Management*, 2022, vol. 506. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119956.
12. 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).
13. Geltman V. S. *Geograficheskiy i tipologicheskiy analiz lesnoy rastitel'nosti Belorussii* [Geographical and typological analysis of forest vegetation in Belarus]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1982. 326 p. (In Russian).
14. Holmes R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bull.*, 1983, no. 44, pp. 69–75.
15. Fritts H. C. Tree-ring analysis: tool for water resource. *Trans. Amer. Geolog. Union.*, 1969, vol. 50, pp. 22–29.
16. Holmes R. L. Dendrochronology program library. Users manual. Tucson, Arizona, 1984. 51 p.

17. Yermokhin M. V. Impact of climatic factors on the tree rings variability of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in Belarus. *Botanika (issledovaniya): sbornik nauchnykh trudov* [Botany (research): digest of scientific papers], 2008, issue 35, pp. 34–45 (In Russian).

18. Molotkov P. I. *Bukovyie lesa i khozyaystvo v nikh* [Beech forests and forestry in them]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1966. 224 p. (In Russian).

19. Yermokhin M. V. Dendrochronological zoning of Scots pine in Belarus. *Vestsi Natsyyanal'nay akademii navuk Belarusi* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus], Biological series, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 441–453 (In Russian).

20. Yermokhin M. V., Barsukova T. L., Knysh N. V., Mychko V. E., Bernatsky D. I. Dynamics and state of the Silver fir population in the Tysovik tract. *Belovezhskaya pushcha. Issledovaniya* [Belovezhskaya Pushcha. Research], 2016, issue 14, pp. 57–81 (In Russian).

21. Kolari P., Chan T., Porcar-Castell A., Bäck J., Nikinmaa E., Juurola E. Field and controlled environment measurements show strong seasonal acclimation in photosynthesis and respiration potential in boreal Scots pine. *Frontiers Plant Sci.*, 2014, vol. 5, art. 717. DOI: 10.3389/fpls.2014.00717.

22. Pisek A., Winkler E. Assimilation capacity and respiration of spruce (*Picea excelsa* Link) at different altitudes and stone pine (*Pinus cembra* L.) at the alpine tree line. *Planta* [Planta], 1958, vol. 51, no. 4, pp. 518–543 (In German).

23. Sevanto S., Suni T., Pumpanen J., Gronholm T., Kolari P., Nikinmaa E., Hari P., Vesala T. Wintertime photosynthesis and water uptake in a boreal forest. *Tree Physiol.*, 2006, vol. 26, no. 6, pp. 749–757.

24. Sirotkin Yu. D., Seroglazova L. M. Seasonal growth of Douglas-fir wood. *Lesovedeniye i lesnoye khozyaystvo: respublikanskiy mezhdedomstvennyy sbornik* [Forest science and forestry: republican interdepartmental digest], 1969, no. 2, pp. 138–143 (In Russian).

25. Levanic T., Straus H. Effects of Climate on Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) Growth Southeast of the European Alps. *Plants*, 2022, vol. 11. DOI: 10.3390/plants11121571.

Информация об авторах

Ермохин Максим Валерьевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии леса и дендрохронологии. Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 27, Республика Беларусь). E-mail: maxim.yermokhin@gmail.com

Игнатъев Ярослав Константинович – младший научный сотрудник лаборатории экологии леса и дендрохронологии. Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 27, Республика Беларусь). E-mail: ignatev.y.k@gmail.com

Старикова Лилия Ивановна – младший научный сотрудник лаборатории экологии леса и дендрохронологии. Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 27, Республика Беларусь). E-mail: liliya.star18@gmail.com

Information about the authors

Yermokhin Maxim Valer'evich – PhD (Biology), Leading Researcher, the Laboratory of Forest Ecology and Dendrochronology. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Science of Belarus (27, Academicheskaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: maxim.yermokhin@gmail.com

Ignatiev Yaroslav Konstantinovich – Junior Researcher, the Laboratory of Forest Ecology and Dendrochronology. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Science of Belarus (27, Academicheskaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ignatev.y.k@gmail.com

Starikova Liliya Ivanovna – Junior Researcher, the Laboratory of Forest Ecology and Dendrochronology. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Science of Belarus (27, Academicheskaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: liliya.star18@gmail.com

Поступила 28.11.2022

ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЕ И ЛЕСОРАЗВЕДЕНИЕ FOREST REGENERATION AND FOREST GROWING

УДК 630*443.2*414:631*812

И. А. Машкин¹, А. А. Макеенко², В. П. Шуканов¹, Е. В. Мельникова¹,
Л. А. Корытько¹, С. Н. Полянская¹

¹ Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича НАН Беларуси

² Институт природопользования НАН Беларуси

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ХИМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ ТОРФА ОТ ПРОИЗВОДСТВА ПРЕПАРАТА «ГИДРОГУМАТ» ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СЕМЯН И СЕЯНЦЕВ СОСНЫ (*PINUS SYLVESTRIS* L.)

В статье приведены данные лабораторных и полевых опытов по исследованию влияния побочных продуктов химической деструкции торфа (отходов) от производства регулятора роста «Гидрогумат» на качество посевного и посадочного материала сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Семена подвергали предпосевной обработке отходами путем замачивания и инкрустации в сочетании с пленкообразователем «Гисинар-М», а сеянцы двукратно опрыскивали рабочими растворами во время вегетации. После обработок оценивали посевные качества (энергия прорастания, техническая всхожесть) и среднесеменной покой семян, а также морфобиометрические (длина надземной и подземной части, толщина корневой шейки) и физиолого-биохимические (содержание пигментов фотосинтеза в хвое и проницаемость мембран клеток растений) показатели сеянцев с открытой и закрытой корневыми системами.

Выявлено положительное действие произведенных предпосевных и внекорневых обработок отходами от производства регулятора роста «Гидрогумат» на качество посевного и посадочного материала сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). В частности, обработки способствовали увеличению энергии прорастания и технической всхожести семян на фоне сокращения среднего семенного покоя. Также отмечена активация фотосинтетических процессов растений, сопровождающаяся повышением количества хлорофиллов и каротиноидов в хвое сеянцев с открытой и закрытой корневыми системами, при одновременном повышении целостности мембран клеток.

Ключевые слова: семена, сеянцы, сосна, регуляторы роста, Гидрогумат, отходы, пигменты фотосинтеза, мембраны клеток.

Для цитирования: Машкин И. А., Макеенко А. А., Шуканов В. П., Мельникова Е. В., Корытько Л. А., Полянская С. Н. Использование отходов химической деструкции торфа от производства препарата «Гидрогумат» для повышения качества семян и сеянцев сосны (*Pinus sylvestris* L.) // Труды БГТУ. Сер. 1. Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 14–22. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-02.

I. A. Mashkin¹, A. A. Makeenko², V. P. Shukanov¹, E. V. Melnikowa¹,
L. A. Korytsko¹, S. N. Poljanskaja¹

¹V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus

²Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus

THE USE OF PEAT CHEMICAL DESTRUCTION WASTE FROM THE PRODUCTION OF THE HYDROHUMATE PREPARATION TO IMPROVE THE QUALITY OF PINE SEEDS AND SEEDLINGS (*PINUS SYLVESTRIS* L.)

The article presents the results of experiments to study the effect of by-products of the chemical destruction of peat (waste) from the production of growth regulator “Hydrogumat” on the quality of seed and planting material of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Seeds were treated with waste by soaking and

incrustation in combination with Gisinar-M, and seedlings were sprayed twice with solutions during the growing season. After treatments, the sowing qualities (germination energy, technical germination) and average seed dormancy, as well as morphobiometric (length of the aboveground and underground parts, thickness of the root neck) and physiological and biochemical (content of photosynthesis pigments in the needles and permeability of plant cell membranes) parameters of seedlings.

A positive effect of presowing and foliar treatments with waste from the production of Hydrogumat on the quality of seeds and seedlings of Scotch pine was revealed. Treatments contributed to an increase in germination energy and technical germination of seeds against the background of a decrease in the average seed dormancy of seeds. Activation of photosynthetic processes of plants was also noted, accompanied by an increase in the amount of chlorophylls and carotenoids in the needles of seedlings with an open and closed root system and a simultaneous increase in the integrity of cell membranes in photosynthetic and oxidative processes, as well an increase in the integrity of plant cell membranes.

Keywords: seeds, seedling, pine, growth regulators, Hydrohumate, waste, photosynthesis pigments, cell membranes.

For citation: Mashkin I. A., Makeenko A. A., Shukanov V. P., Melnikova E. V., Korytsko L. A., Poljanskaja S. N. The use of peat chemical destruction waste from the production of the Hydrohumate preparation to improve the quality of pine seeds and seedlings (*Pinus sylvestris* L.). *Processing of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 14–22. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-02 (In Russian).

Введение. В настоящее время утилизация отходов химического производства, в том числе с использованием природного органического сырья, является одним из наиболее актуальных вопросов, требующих научных изысканий в данном направлении. Всесторонний анализ возможных путей использования отходов должен позволить разработать способы их рационального применения, например, в животноводстве, ветеринарии, сельском и лесном хозяйстве, что повысит рентабельность производства и окажет положительный экономический эффект в смежных отраслях. Одним из наиболее ценных природных ресурсов для получения биологически активных веществ и содержащих их регуляторов роста, например, Гидрогумата, является торф [1–7]. В основе методов по получению гуматсодержащих препаратов из торфа, разработанных в Институте природопользования НАН Беларуси, лежит химическая окислительно-гидролитическая деструкция торфа с использованием щелочей и кислот, после которой смесь разделяют путем центрифугирования на жидкий целевой продукт и остаток, представляющий собой вязкую массу темно-коричневого цвета, частично растворимую в воде [1–5]. Отходы от производства регулятора роста «Гидрогумат», как правило, характеризуются резким запахом и сильно щелочной средой водной вытяжки, однако содержание в них органических и минеральных веществ достигает 22%, что указывает на возможность их применения для стимулирования роста растений и животных [1–3]. Так, например, на базе лаборатории экотехнологий Института природопользования НАН Беларуси совместно с учеными из Института рыбного хозяйства НАН Беларуси исследовался вопрос

возможного применения отходов от производства гуматсодержащих препаратов для стимулирования развития естественной кормовой базы рыб в прудах. В ходе данных исследований было доказано, что внесение отходов от производства препарата «Гидрогумат» в рыбоводные пруды стимулирует рост планктонных водорослей, а также ракообразных, что приводит к увеличению массы сегментов карпа в первые две недели жизни. Помимо этого был проведен развернутый токсикологический анализ остатков производства гуминовых препаратов при их использовании в выростных и нагульных прудах, который показал, что отходы не являются токсичными для ракообразных и рыб [1]. Однако исследования влияния остатков от производства гуминовых препаратов на организм высших растений не проводились. Таким образом, становится очевидной актуальность дальнейшей работы в данном направлении, в частности, с использованием в качестве объектов исследования основных лесообразующих пород хвойных растений.

Основная часть. В качестве объектов для исследований использовали семена первого класса качества и однолетние сеянцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с открытой и закрытой корневыми системами. Опыты на посевном материале и сеянцах с закрытой корневой системой проводили в лабораторных условиях, а на территории постоянного питомника ГЛХУ «Логойский лесхоз» выращивали сеянцы с открытой корневой системой. Согласно составленной схеме опытов (табл. 1) семена обрабатывали посредством замачивания и инкрустации пленкообразователем «Гисинар-М», регулятором роста «Гидрогумат» и отходами от его

производства, взятыми с промышленных установок ЧПУП «ЧервеньАГРО» в 2020 г. после отделения в центрифуге целевого продукта.

Гисинар-М – пленкообразующее микроудобрение хелатного типа, содержащее такие необходимые растительному организму микроэлементы, как Cu, Zn и Mg. Выпускается в виде вязкого по консистенции полиэлектrolитного гидрогеля, который получают из натриевой соли акриловой кислоты и водорастворимого сополимера акриламида. Гисинар-М, как правило, применяют для инкрустации семян, а также корневых и внекорневых подкормок растений во время вегетации. Использование пленкообразователя в сочетании с другими препаратами должно способствовать их лучшему закреплению на поверхности и уменьшению минимально эффективной дозировки [7, 8].

Гидрогумат – регулятор роста, получаемый путем глубокой переработки торфа, заключающейся в двухступенчатом кислотном-щелочном гидролизе с последующим переходом моносахаридов в жидкую фазу и извлечением гуминовых кислот. В состав Гидрогумата помимо гуминовых кислот входят органические кислоты (янтарная, яблочная, малоновая), широкий спектр аминокислот, а также различные микро- и макроэлементы. Препарат широко применяется в лесном и сельском хозяйстве, так как обладает выраженным ростостимулирующим действием и безопасен для окружающей среды (IV класс опасности) [3–5].

Семена высевали в чашки Петри по 100 шт. в четырехкратной повторности, затем на седьмые и десятые сутки определяли их энергию прорастания, а на пятнадцатые – техническую всхожесть. Дополнительно рассчитывали средний семенной покой, который отражает то, насколько быстро прорастают семена [8, 9].

После проведенной серии опытов по определению влияния обработок на посевные каче-

ства семян были выявлены наиболее эффективные дозировки препаратов, которые использовали для дальнейших экспериментов над сеянцами с закрытой корневой системой. С этой целью предварительно обработанные семена высевали в кассеты Plantek 35F на глубину 1 см по 2 шт. в ячейке, заполненные специальным грунтом для выращивания хвойных пород растений, при этом в вариантах закладывали по 4 кассеты с трехкратной повторностью [8–11].

Сеянцы с открытой корневой системой обрабатывали Гидрогуматом и остатками от его производства одно- или двукратно с интервалом в 30 дней путем опрыскивания вегетирующих растений согласно схеме опытов, отраженной в табл. 1. Для проведения опыта в условиях постоянного питомника ГЛХУ «Логойский лесхоз» весной 2022 г. высевали семена по пятистрочной схеме безрядковым ленточным способом, с промежутками 25 см и строкой шириной около 5 см [8, 12]. На опытном участке площадью 0,3 га случайным образом для каждого варианта были разбиты двухметровые делянки в четырехкратной повторности. Сеянцы в открытом грунте выращивали на протяжении 90 дней.

Для оценки влияния обработок на морфобиометрические показатели растений у сенцев с закрытой и открытой корневой системой на 90-е сутки прорастивания измеряли длину надземной и подземной частей, а также толщину корневой шейки. Случайно отобранный экспериментальный посадочный материал обмеряли специальными измерительными инструментами. Диаметр корневой шейки определяли при помощи штангенциркуля, а длину надземной (по оси стволика от корневой шейки до основания верхушечной почки) и подземной (от корневой шейки до окончания корня) частей – линейкой с миллиметровыми делениями [8, 9].

Таблица 1

Схема проведения опыта по обработке семян и сеянцев сосны

Вариант	Способ обработки	Время, часы	Расход раствора
Контроль (сухие семена)	–	–	–
Контроль (вода)	Замачивание	24	10 л/т семян
Гидрогумат 2 мл/л	Замачивание	24	10 л/т семян
Гидрогумат 2 мл/л + Гисинар-М 50 мл/л	Инкрустация	0,1	10 л/т семян
Гидрогумат (остаток) 1 мл/л	Замачивание	24	10 л/т семян
Гидрогумат (остаток) 2 мл/л	Замачивание	24	10 л/т семян
Гидрогумат (остаток) 4 мл/л	Замачивание	24	10 л/т семян
Гидрогумат (остаток) 1 мл/л + Гисинар-М 50 мл/л	Инкрустация	0,1	10 л/т семян
Гидрогумат (остаток) 2 мл/л + Гисинар-М 50 мл/л	Инкрустация	0,1	10 л/т семян
Гидрогумат (остаток) 4 мл/л + Гисинар-М 50 мл/л	Инкрустация	0,1	10 л/т семян
Гидрогумат 30 мл/га (1 раз)	Внекорневая	–	3 л/га
Гидрогумат 30 мл/га (2 раза)	Внекорневая	–	3 л/га
Гидрогумат (остаток) 30 мл/га (1 раз)	Внекорневая	–	3 л/га
Гидрогумат (остаток) 30 мл/га (2 раза)	Внекорневая	–	3 л/га

Также для семян определяли такие физиолого-биохимические параметры, как содержание пигментов фотосинтеза (хлорофиллы, каротиноиды) в хвое и проницаемость мембран клеток. Для измерений были выбраны спектрофотометрические и кондуктометрические методы.

Содержание пигментов фотосинтеза проводили на образцах хвои с навеской, равной 0,1 г, отобранной в трехкратной повторности для каждого варианта, из которой получали ацетоновую вытяжку пигментов. Для этого вакуумным способом на насосе Комовского фильтровались экстракты пигментов и в последующем измерялась оптическая плотность вытяжек при помощи универсального спектрофотометра Proscan MC 122 (определяемая длина волны от 190 до 1100 нм). Точное содержание пигментов по отдельности устанавливали, основываясь на трехволновом спектрофотометрическом методе, путем измерения оптических плотностей ацетоновых вытяжек (D) на длинах волны 440, 644, 662 нм, которые соответствуют известным максимумам поглощения каротиноидов, хлорофилла b и хлорофилла a в ацетоне. Концентрацию (C , мг/г свежей массы) хлорофиллов a и b и их сумму рассчитывали по уравнениям Винтерманс и Де Мотс (Wintermans, De Mots, 1965) для ацетона, а концентрацию каротиноидов в общей вытяжке пигментов – по уравнению Веттштейна (Wettstein, 1957) [8, 9, 13–19].

Для выявления степени проницаемости цитоплазматических мембран растительных клеток определяли интенсивность выхода водорастворимых веществ из тканей семян. Образцы свежей хвои массой 0,5 г на 3 ч помещали в емкости, заполненные дистиллированной водой до отметки 25 мл. Затем инкубируемую хвою удаляли, а оставшуюся воду анализировали на

наличие водорастворимых веществ (мг/л) с помощью портативного многодиапазонного кондуктометра HI-8734, при этом в расчетах учитывали фоновые показания для чистой дистиллированной воды [9, 13–17].

Статистическая значимость полученных экспериментальных данных подтверждена путем расчета стандартной ошибки среднего (уровень надежности 95%) и проверкой равенства средних значений в обозначенных выборках по t -критерию Стьюдента ($p = 0,05$) с использованием программного обеспечения Microsoft Excel 2013 [8, 20].

По результатам исследования влияния различных способов предпосевной обработки семян сосны гуматсодержащим препаратом «Гидрогумат», или остатками от его производства отдельно и в сочетании с пленкообразующим микроудобрением «Гисинар-М» на посевные качества и среднесуточный покой видно, что обработки в большинстве случаев вызывают статистически значимые колебания данных показателей (табл. 2). При этом инкрустация в основном либо не оказала существенного влияния на посевные качества и среднесуточный покой семян сосны, либо вызвала некоторое ухудшение роста относительно контрольных показателей. Однако в части экспериментальных вариантов, например, при инкрустации семян рабочей смесью «Гисинар-М» и остатками от производства Гидрогумата, почти всегда отмечалось статистически достоверное снижение среднесуточного покоя семян, одновременно в этих же вариантах обработки наблюдалось существенное снижение энергии прорастания и технической всхожести в случае увеличения дозировки отходов от производства Гидрогумата с 1 до 2 и 4 мл/л воды.

Таблица 2

Влияние обработок на посевные качества и среднесуточный покой семян сосны

Вариант	Среднесуточный покой, дней ($M \pm m$)	Средняя энергия прорастания, % ($M \pm m$)	Средняя техническая всхожесть, % ($M \pm m$)
Контроль (вода)	5,22 ± 0,05	82,50 ± 0,96	83,50 ± 1,19
Контроль (сухие семена)	5,37 ± 0,08	73,75 ± 3,47	75,75 ± 3,54
Гидрогумат 2 мл/л	5,14 ± 0,03*	89,00 ± 0,91*	90,50 ± 0,87*
Гидрогумат 2 мл/л + Гисинар-М 50 мл/л	5,28 ± 0,02*	72,75 ± 1,03	74,75 ± 0,75
Гидрогумат (остаток) 1 мл/л	5,17 ± 0,04*	81,00 ± 0,71	83,00 ± 0,71
Гидрогумат (остаток) 2 мл/л	5,10 ± 0,03*	87,50 ± 0,65*	88,00 ± 0,82*
Гидрогумат (остаток) 4 мл/л	5,12 ± 0,03*	92,00 ± 0,71*	93,50 ± 1,19*
Гидрогумат (остаток) 1 мл/л + Гисинар-М 50 мл/л	5,27 ± 0,03*	70,75 ± 0,48	73,00 ± 0,58
Гидрогумат (остаток) 2 мл/л + Гисинар-М 50 мл/л	5,20 ± 0,04*	67,25 ± 0,48*	69,00 ± 0,71*
Гидрогумат (остаток) 4 мл/л + Гисинар-М 50 мл/л	5,20 ± 0,02*	64,00 ± 1,35*	65,25 ± 1,31*

* Данные статистически значимы по t -критерию Стьюдента ($p = 0,05$).

Заметного положительного эффекта на рост семян удалось достигнуть при отдельном замачивании посевного материала сосны в рабочих растворах регулятора роста «Гидрогумат» и отходов от его производства. При этом в случае с замачиванием семян в остатках наиболее выраженное положительное влияние на посевные качества отмечено в варианте с максимальной испытанной дозировкой в рабочем растворе (4 мл/л воды), на фоне этого наблюдался минимальный среди всех вариантов опыта среднесуточный покой семян. Примечательно то, что при замачивании семян в отходах от производства Гидрогумата удалось добиться сравнительно более существенного положительного действия, нежели после обработки целевым продуктом, однако для этого потребовалось двукратное увеличение дозировки отходов по отношению к вариантам с регулятором роста. Из полученных экспериментальных данных видно, что произведенные предпосевные и внекорневые обработки, как правило, способствуют активации ростовых процессов семян сосны с закрытой и открытой корневой системой (табл. 3). В большинстве экспериментальных вариантов отмечено статистически значимое в сравнении с контролем увеличение длины надземной и подземной частей растений, однако у семян с закрытой корневой системой толщина корневой шейки после внесения испытываемых веществ остается практически на уровне контрольных значений и колеблется в пределах погрешности. Также несущественно изменяется по отношению к контролю длина растений в случае однократной внекорневой обработки посадочного материала Гидрогуматом и инкрустации семян

отходами от его производства. В целом же для семян с закрытой корневой системой более эффективным оказалось предпосевное замачивание, нежели инкрустация с использованием пленкообразователя, а посадочный материал с открытой корневой системой, как правило, рос лучше при двукратной внекорневой обработке растений препаратом «Гидрогумат» и отходами от его производства.

Выявлено, что обработки посевного и посадочного материала влияют не только на внешние видимые параметры растений, но и изменяют их физиолого-биохимические процессы, в частности стимулируют образование пигментов фотосинтеза в хвое семян и повышают целостность цитоплазматических мембран растительных клеток (табл. 4). Однако полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что наиболее выраженный положительный эффект при внесении испытываемых смесей физиологически активных веществ показан для семян сосны с открытой корневой системой. Во всех опытных вариантах по выращиванию семян в условиях постоянного питомника отмечается статистически значимое повышение концентрации пигментов фотосинтеза в хвое и существенное сокращение выхода водорастворимых веществ из тканей растений относительно контрольных значений. У семян, выращенных в закрытом грунте, достоверные по *t*-критерию Стьюдента количественные изменения пигментов фотосинтеза относительно контрольной выборки наблюдаются только при замачивании или инкрустации с пленкообразователем «Гисинар-М» посевного материала отходами от производства Гидрогумата.

Таблица 3

Влияние обработок на морфобиометрические параметры семян сосны (3 мес.)

Варианты опыта	Длина побега, мм ($M \pm m$)	Длина корня, мм ($M \pm m$)	Толщина корневой шейки, мм ($M \pm m$)
Сеянцы с закрытой корневой системой			
Контроль (вода)	67,30 ± 1,94	25,30 ± 1,81	0,78 ± 0,02
Гидрогумат 2 мл/л	76,70 ± 2,49*	39,60 ± 3,05*	0,81 ± 0,02
Гидрогумат 2 мл/л + Гисинар-М 50 мл/л	74,40 ± 2,12*	35,40 ± 3,52*	0,75 ± 0,02
Гидрогумат (остаток) 2 мл/л	75,10 ± 1,18*	40,40 ± 3,13*	0,73 ± 0,02
Гидрогумат (остаток) 2 мл/л + Гисинар-М 50 мл/л	71,60 ± 1,40	38,00 ± 3,54*	0,74 ± 0,01
Сеянцы с открытой корневой системой			
Контроль (вода)	42,90 ± 1,57	28,90 ± 2,79	0,73 ± 0,03
Гидрогумат 30 мл/га (1 раз)	46,30 ± 1,57	33,70 ± 2,00	0,85 ± 0,02*
Гидрогумат 30 мл/га (2 раза)	62,10 ± 2,09*	35,60 ± 2,70*	1,04 ± 0,03*
Гидрогумат (остаток) 30 мл/га (1 раз)	50,80 ± 2,04*	45,60 ± 4,56*	0,82 ± 0,04*
Гидрогумат (остаток) 30 мл/га (2 раза)	64,40 ± 1,55*	39,90 ± 2,38*	1,01 ± 0,02*

* Данные статистически значимы по *t*-критерию Стьюдента ($p = 0,05$).

Таблица 4

Влияние обработок на физиолого-биохимические показатели сеянцев сосны (3 мес.)

Варианты опыта	Хлорофилл <i>a</i> , мг/г ($M \pm m$)	Хлорофилл <i>b</i> , мг/г ($M \pm m$)	Каротиноиды, мг/г ($M \pm m$)	Выход водорас- творимых веществ, мг/л ($M \pm m$)
Сеянцы с закрытой корневой системой				
Контроль (вода)	1,230 ± 0,042	0,419 ± 0,015	0,755 ± 0,027	29,20 ± 0,35
Гидрогумат 2 мл/л	1,198 ± 0,023	0,403 ± 0,009	0,756 ± 0,015	25,06 ± 0,12*
Гидрогумат 2 мл/л + Гисинар-М 50 мл/л	1,206 ± 0,016	0,388 ± 0,006	0,763 ± 0,010	27,13 ± 0,12*
Гидрогумат (остаток) 2 мл/л	1,246 ± 0,020*	0,398 ± 0,006	0,794 ± 0,013	21,46 ± 0,08*
Гидрогумат (остаток) 2 мл/л + Гисинар-М 50 мл/л	1,276 ± 0,015*	0,405 ± 0,005	0,813 ± 0,011*	20,26 ± 0,08*
Сеянцы с открытой корневой системой				
Контроль (вода)	0,845 ± 0,010	0,269 ± 0,020	0,641 ± 0,010	2,95 ± 0,05
Гидрогумат 30 мл/га (1 раз)	1,089 ± 0,010*	0,336 ± 0,010*	0,685 ± 0,010*	1,08 ± 0,04*
Гидрогумат 30 мл/га (2 раза)	1,164 ± 0,009*	0,379 ± 0,010*	0,713 ± 0,011*	1,00 ± 0,06*
Гидрогумат (остаток) 30 мл/га (1 раз)	1,022 ± 0,010*	0,306 ± 0,009*	0,754 ± 0,010*	1,03 ± 0,10*
Гидрогумат (остаток) 30 мл/га (2 раза)	0,916 ± 0,009*	0,273 ± 0,010*	0,567 ± 0,009*	2,35 ± 0,05*

* Данные статистически значимы по *t*-критерию Стьюдента ($p = 0,05$).

В свою очередь, статистически значимое сокращение выхода водорастворимых веществ из тканей посадочного материала сосны с закрытой корневой системой наблюдается как при предпосевной обработке семян Гидрогуматом, так и отходами от его производства. Стоит отметить, что замачивание семян в рабочих растворах отходов от производства Гидрогумата приводило к повышению содержания в хвое сеянцев с закрытой корневой системой только хлорофилла *a*, инкрустация же отходами в сочетании с Гисинаром-М привела к увеличению концентрации в вытяжке каротиноидов. Данную закономерность можно объяснить либо пропорциональным увеличением пигментов, либо наличием стресса, в том числе при внесении препаратов, что могло повлиять на каротиноиды [13].

Заключение. Таким образом, проведенные исследования влияния обработок побочными продуктами химической деструкции торфа от производства препарата «Гидрогумат» на качество посевного и посадочного материала сосны обыкновенной доказывают эффективность их

применения как отдельно, так и в сочетании с пленкообразователями. Отмечена значительная активация ростовых процессов и болезнестойчивости растений, которая видна по морфобиометрическим параметрам и на физиолого-биохимическом уровне. У сеянцев с закрытой корневой системой под влиянием обработок наблюдается существенное удлинение надземной и подземной частей, а у сеянцев в открытом грунте также происходит заметное утолщение корневой шейки. На фоне этого в хвое растений после внесения испытываемых веществ зафиксировано статистически значимое относительно контроля увеличение количества пигментов фотосинтеза, сопровождающееся сокращением выхода водорастворимых веществ из тканей сеянцев. Все это указывает на более успешное протекание первичного метаболизма и реализацию потенциала болезнестойчивости растений. Работа осуществлялась в период с 2021 по 2022 г. при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Б21М-007А от 01.07.2021).

Список литературы

1. Перспективы использования твердых отходов гуминового производства для стимулирования развития естественной кормовой базы рыб / Г. В. Наумова [и др.] // Природопользование. 2020. № 1. С. 144–154.
2. Макеенко А. А. Состав и свойства побочных продуктов окислительной деструкции торфа и возможные направления их использования // Химия твердого топлива. 2020. № 2. С. 63–68.
3. Исследование состава органической и минеральной частей твердых отходов от производства гуминовых препаратов / И. И. Лиштван и др. // Природопользование. 2021. № 1. С. 187–197.
4. Лиштван И. И., Лис Л. С. Этапы становления и развития науки о торфе и сапропелях // Природопользование. 2018. № 2. С. 6–21.

5. Томсон А. Э., Наумова Г. В. Торф и продукты его переработки. Минск: Беларус. навука, 2009. 328 с.
6. Торф: ресурсы, технологии, геоэкология / В. И. Косов [и др.]. СПб.: Наука, 2007. 452 с.
7. Гудак С. П., Синичкина А. М., Хомич П. З. Полезные ископаемые Беларуси. Минск: Адукацыя, выхаванне, 2002. 527 с.
8. Машкин И. А., Корытько Л. А., Шуканов В. П. Влияние защитно-стимулирующих препаратов на болезнеустойчивость и качественные характеристики сеянцев ели (*Picea abies*) с закрытой корневой системой // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2020. № 2 (234). С. 109–119.
9. Волюнец А. П., Шуканов В. П. Физиология патогенеза и болезнеустойчивости растений. Минск: Беларус. навука, 2016. 252 с.
10. Якимов Н. И., Крук Н. К., Юренин А. В. Агротехника выращивания сеянцев сосны обыкновенной в условиях закрытого грунта // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2018. № 1 (204). С. 25–30.
11. Степанов С. А., Зайцева М. И. Выращивание и использование посадочного материала с закрытой корневой системой. Петрозаводск: ПетрГУ, 2015. 27 с.
12. Якимов Н. И., Носников В. В. Лесные питомники. Минск: БГТУ, 2011. 54 с.
13. Эндогенные фиторегуляторы роста: свойства, физиологическое действие и практическое использование / А. П. Волюнец [и др.]. Минск: Беларус. навука, 2019. 233 с.
14. Ламан Н. А., Алексейчук Г. Н., Калацкая Ж. Н. Современная технология предпосевной обработки семян // Наука и инновации. 2006. № 9 (43). С. 37–41.
15. Иванов В. Б. Практикум по физиологии растений. М.: Академия, 2001. 136 с.
16. Храмченкова О. М. Практикум по физиологии растений: практическое руководство. В 2 ч. Ч. 1. Гомель: ГГУ, 2017. 44 с.
17. Коробко В. В., Касаткин М. Ю. Большой практикум по физиологии растений. Саратов: СГУ, 2017. 103 с.
18. Титова М. С. Содержание фотосинтетических пигментов в хвое *Picea abies* и *Picea koraiensis* // Вестник ОГУ. 2010. № 12. С. 9–12.
19. Шальго Н. В. Биосинтез хлорофилла и фотодинамические процессы в растениях. Минск: Право и экономика, 2004. 156 с.
20. Сиделев С. И. Математические методы в биологии и экологии: введение в элементарную биометрию. Ярославль: ЯрГУ, 2012. 140 с.

References

1. Naumova G. V., Pantelei S. N., Ovchinnikova T. F., Zhmakova N. A., Makarova N. L., Makeenko A. A., Sennikova V. D. Prospects for the use the solid waste of humic production for the stimulation of the development of natural fish food supply. *Prirodopol'zovaniye* [Nature Management], 2020, no. 1, pp. 144–154 (In Russian).
2. Makeenko A. A. Composition and properties of by-products of oxidative destruction of peat and possible directions of their use. *Khimiya tverdogo topliva* [Chemistry of solid fuels], 2020, no. 2, pp. 63–68 (In Russian).
3. Lishtvan I. I., Naumova G. V., Zhmakova N. A., Makarova N. L., Ovchinnikova T. F., Makeenko A. A. Investigation of the composition of the organic and mineral parts of solid waste from the production of humic preparations. *Prirodopol'zovaniye* [Nature Management], 2021, no. 1, pp. 187–198 (In Russian).
4. Lishtvan I. I., Lis L. S. Stages of the formation and development of peat and spropel science. *Prirodopol'zovaniye* [Nature Management], 2018, no. 2, pp. 6–21 (In Russian).
5. Thomson A. E., Naumova G. V. *Torf i produkty yego pererabotki* [Peat and products of its processing]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2009. 328 p. (In Russian).
6. Kosov V. I., Belyakov A. S., Belozherov O. V., Gogin D. Yu. *Torf: resursy, tekhnologii, geoekologiya* [Peat: Resources, Technologies, Geoecology]. St. Peterburg, Nauka Publ., 2007. 452 p. (In Russian).
7. Gudak S. P., Sinichkina A. M., Khomich P. Z. *Poleznyye iskopayemyye Belarusi* [Minerals of Belarus]. Minsk, Adukatsyya, vykhavanne, 2002. 527 p. (In Russian).
8. Mashkin I. A., Korytsko L. A., Shukanov V. P. The effect of protective-stimulating products on personal instability and qualitative characteristics of spruce (*Picea abies*) seedlings with closed root system. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2020, no. 2 (234), pp. 109–119 (In Russian).

9. Volynets A. P., Shukanov V. P. *Fiziologiya patogeneza i boleznoustoychivosti rasteniy* [Pathogenesis physiology and disease resistance of plants]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2016. 252 p.
10. Yakimov N. I., Kruk N. K., Yurenya A. V. Agricultural cultivation of seedlings of scots pine in a greenhouse. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2018, no. 1 (204), pp. 25–30 (In Russian).
11. Stepanov S. A., Zaitseva M. I. *Vyrashchivaniye i ispol'zovaniye posadochnogo materiala s zakrytoy kornevoy sistemoy* [Cultivation and use of planting material with a closed root system]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2015. 27 p. (In Russian).
12. Yakimov N. I., Nosnikov V. V. *Lesnyye pitomniki* [Forest nurseries]. Minsk, BSTU Publ., 2011. 54 p. (In Russian).
13. Volynets A. P., Shukanov V. P., Polyanskaya S. N., Manzhelesova N. E., Korytsko L. A., Litvinovskaya R. P., Safonov D. P., Mashchenko N. E., Mel'nikova E. V., Lakhvich F. A., Goncharuk V. M., Golub I. A., Shanbanovich G. N., Savel'yev N. S. *Endogennyye fitoregulyatory rosta: svoystva, fiziologicheskoye deystviye i prakticheskoye ispol'zovaniye* [Endogenous phyto regulators of growth: properties, physiological action and practical use]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2019. 233 p. (In Russian).
14. Laman N. A., Alekseychuk G. N., Kalatskaya J. N. Modern technology for pre-sowing seed treatment. *Nauka i innovatsii* [Science and innovation], 2006, no. 9 (43), pp. 37–41 (In Russian).
15. Ivanov V. B. *Praktikum po fiziologii rasteniy* [Workshop on plant physiology]. Moscow, Akademiya Publ., 2001. 136 p. (In Russian).
16. Khranchenkova O. M. *Praktikum po fiziologii rasteniy: prakticheskoye rukovodstvo* [Workshop on plant physiology: a practical guide]. Gomel, GGU Publ., 2017. 44 p. (In Russian).
17. Korobko V. V., Kasatkin M. Yu. *Bol'shoy praktikum po fiziologii rasteniy* [Large workshop on plant physiology]. Saratov, SGU Publ., 2017. 103 p. (In Russian).
18. Titova M. S. Content of photosynthetic pigments in the needles of *Picea abies* and *Picea koraiensis*. *Vestnik OGU* [Bulletin of OSU], 2010, no. 12, pp. 9–12 (In Russian).
19. Shalygo N. V. *Biosintez khlorofilla i fotodinamicheskiye protsessy v rasteniyakh* [Chlorophyll biosynthesis and photodynamic processes in plants]. Minsk, Pravo i ekonomika Publ., 2004. 156 p. (In Russian).
20. Sidelev S. I. *Matematicheskiye metody v biologii i ekologii: vvedeniye v elementarnuyu biometriyu* [Mathematical methods in biology and ecology: an introduction to elementary biometrics]. Yaroslavl, YarGU Publ., 2012. 140 p. (In Russian).

Информация об авторах

Машкин Иван Анатольевич – научный сотрудник лаборатории физиологии патогенеза и болезнеустойчивости растений. Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 27, Республика Беларусь). E-mail: ivan.mashkin.1993@gmail.com

Макеенко Александр Александрович – младший научный сотрудник лаборатории экотехнологий. Институт природопользования НАН Беларуси (220076, г. Минск, ул. Франциска Скорины, 10, Республика Беларусь). E-mail: makeenko1507@mail.ru

Шуканов Владимир Петрович – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией физиологии патогенеза и болезнеустойчивости растений. Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 27, Республика Беларусь). E-mail: patphysio@mail.ru

Мельникова Елена Владимировна – старший научный сотрудник лаборатории физиологии патогенеза и болезнеустойчивости растений. Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 27, Республика Беларусь). E-mail: patphysio@mail.ru

Корытько Лариса Александровна – научный сотрудник лаборатории физиологии патогенеза и болезнеустойчивости растений. Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 27, Республика Беларусь). E-mail: patphysio@mail.ru

Полянская Светлана Николаевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории физиологии патогенеза и болезнеустойчивости растений. Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 27, Республика Беларусь). E-mail: patphysio@mail.ru

Information about the authors

Mashkin Ivan Anatol'yevich – Researcher, the Laboratory of Pathogenesis Physiology and Disease Resistance of Plants. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ivan.mashkin.1993@gmail.com

Makeenko Aleksandr Aleksandrovich – Junior Researcher, Ecotechnologies Laboratory. Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Francysk Skorina str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: makeenko1507@mail.ru

Shukanov Vladimir Petrovich – PhD (Biology), Head of the Laboratory of Pathogenesis Physiology and Disease Resistance of Plants. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: patphysio@mail.ru

Melnikova Elena Vladimirovna – Senior Researcher, the Laboratory of Pathogenesis Physiology and Disease Resistance of Plants. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: patphysio@mail.ru

Korytsko Larisa Aleksandrovna – Researcher, the Laboratory of Pathogenesis Physiology and Disease Resistance of Plants. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: patphysio@mail.ru

Poljanskaja Svetlana Nikolaevna – PhD (Biology), Senior Researcher, the Laboratory of Pathogenesis Physiology and Disease Resistance of Plants. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: patphysio@mail.ru

Поступила 15.10.2022

УДК 630*232

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

PROBLEMS OF REFORESTATION IN THE LEBANESE REPUBLIC

Each geographical location has its own dynamic on different levels, such as but not limited to climatological, soil, vegetation, population, economic and many more. The fast-changing paste of cultural, environmental, economic, and many other factors made it hard on the vegetation cover to heal and recover. As a result, a lot of forests have shrunk in area, in vegetation density, even disappeared. Tremendous efforts are invested towards stopping and/or reversing the deforestation occurring due its vital importance, one of it is through reforestation. All previously mention factors along other factors have affected the Lebanese context of reforestation in a way or another. Lebanese forests regressed to dramatical levels, where it became an issue of vital importance due to the big environmental role play the vegetation cover in terms of soil erosion, water conservation, animal habitat, and air purification. This article shed the light on the reforestation challenges and problems in Lebanon, where key challenges are addressed and dissected. In addition, an insight on the past and recent reforestation techniques, projects, and how international organization stepped in under the Lebanese Government umbrella and helped to render the whole pross more efficient with a higher degree of success.

Keywords: reforestation, Lebanon forests, climate change, reforestation challenges.

For citation: Nosnikov V. V., Alam M. Problems of reforestation in the Lebanese Republic. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 23–33. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-03.

В. В. Носников, М. Алам
Белорусский государственный технологический университет

ПРОБЛЕМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛЕСОВ В ЛИВАНСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ

Каждое географическое положение имеет свою собственную динамику процессов на разных уровнях, таких как климатологический, почвенный, растительный, демографический, экономический и многие другие. Быстро меняющаяся совокупность культурных, экологических, экономических и многих других факторов затрудняла восстановление растительного покрова. В результате многие леса сократились по площади, по густоте растительности, даже исчезли. Огромные усилия прилагаются к тому, чтобы остановить и/или обратить вспять обезлесение, что является следствием крайней жизненной важности данного процесса, одним из направлений которых является восстановление лесов. Все ранее упомянутые факторы наряду с другими факторами так или иначе повлияли на контекст лесовосстановления в Ливане. Леса в этой стране регрессировали до критического уровня, вследствие чего их восстановление стало проблемой жизненной важности из-за большой экологической роли, которую играет растительный покров с точки зрения эрозии почвы, сохранения воды, среды обитания животных и очистки воздуха. Эта статья описывает опыт лесовосстановления в Ливане с рассмотрением и анализом ключевых проблем. Кроме того, оценка ранее использовавшихся и современных методов лесовосстановления, государственных программ и проектов в этой области, а также роли международных организаций и степени их взаимодействия с правительством Ливана поможет сделать весь процесс восстановления лесов более эффективным и более успешным.

Ключевые слова: лесовосстановление, леса Ливана, изменение климата, проблемы лесовосстановления.

Для цитирования: Носников В. В., Алам М. Проблемы восстановления лесов в Ливанской Республике // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 23–33. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-03.

Introduction. Lebanon is situated in the Eastern part of the Mediterranean Basin, where three continents intersect [1]. With a total area of 10,452 km², the Lebanese terrain is categorized as

rugged mountainous, where both Eastern mountains series known as the Anti Lebanon mountains chain, and the Western one known as Mount Lebanon mountains chain consist $\frac{3}{4}$ of the country total area [2–4].

Distinctively, Lebanon is located in a zone classified as semi-arid, and distinguished by its ecological diversity [5], where it is a habitat for 2.63% of the world species ranging from birds, to mammals and reptiles [6], and 1.11% of its plant species [7].

Lebanon's woods have been abused to an incredible level, and took advantage of through hundreds of years tracing all the way back to 7,700 BC with the Neolithic civilisations passing by a few civilisations, countries and Realms like the Phoenicians, Babylonians, Rulers of Israel, Romans, and the Ottomans [8–10]. As such, Lebanon biological variety is known to be a home of in excess of 2,600 species in spite of the multitude of anthropogenic difficulties, where 12% of subject can be tracked down just around here and delegated provincially endemic [11–13].

Lebanon was covered with enormous timberlands of conifers as indicated by verifiable records; it was assessed more that 70% of Lebanon's complete region was covered with ancient woodlands [8]. Furthermore, forests were under tension of metropolitan abuse in mountains from the seventh 100 years alongside undeniably related exercises, for example, taking advantage of timberland for rural purposes, gathering the wood for railways, kindling and livestock grazing, and all land deterioration that followed the new sloppy seaside urban communities and mountain resorts inciting land corruption what diminished the timberland inclusion and impacted the forest recovery cycle [8, 14, 15]. Moreover, notwithstanding all the threatening factors referenced previously, Lebanese woodlands were impacted over the most recent 50 years by environment changes, Lebanese nationwide conflict, huge bushfires, microbes and bugs that obliterated and influenced a lot of those timberlands [8, 16–19].

Today, the forests are estimated to cover less than 13% of Lebanon's total area [20]; therefore, the Ministry of Environment (MoE) has sent off a Public Reforestation Plan meaning to expand the forest cover from 13 to 20% over a time of 30 years, upheld by regions and different neighborhood and worldwide associations [8]. On a short time period, the MoE launched with the cooperation of United Nations Development Programme (UNDP) and the Global Environment Facility (GEF) a 5-year building capacity project known as the "Safeguarding and Restoring Lebanon's Woodland Resources Project" (SRLWRP).

Results and discussion. By 2020 the forest cover in Lebanon was assessed at 143 thousand hectares addressing 13.7% of its all-out surface region [21], that extrapolating information revealed by the Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO in 2005 [20] is dared to be framed of 32% conifers, for example, *Juniperus excelsa* (23%), *Pinus pinea* (18%), *Cedrus libani* (5%) and

Cupressus sempervirens (3%), and 40% a blend of *Pinus brutia* and *Pinus halepensis*.

Late examinations feature the basic overall impact of climatic changes notwithstanding habitat loss on biodiversity [22, 23]. Recent research done in the 21st century has demonstrated that these progressions are progressively influencing the biological systems of backwoods and forest [23–30], where dieback numbers and additionally grow rates decline became huge and related with, occasional and outrageous climate variance connected with declination in precipitation and temperature increment overall for long windows of time [24–27, 29–35]. Current researchers are assessing that a ton of the environment changes will be tending either to increment or become the new typical, what will enhance the unsettling influence saw of woodland's biological system [26, 27, 30, 36, 37]. Specialists guarantee that environment changes will affect contrastingly the biological systems and individual species all over the planet [18, 27].

Lebanon lies within a recognized core of plant diversity that is known as a global hotspot because of its biogeography, geology, topography, and early human settlements unique to the Mediterranean basin [12, 38], where it is considered a habitat for more than 9,119 species of animals and plants [39].

Lebanese woodlands are situated in one of the most vulnerable regions to climatic changes on the planet, what is affecting timberlands as well as their species dissemination [40]. Research have noted that mind to final part of the twentieth century precipitations has diminished in wintertime in the Mediterranean area, where Lebanon keeps on confronting dry spell related with impacts of anthropogenic climatic changes through the 21st century classifying the ongoing dry season period of getting the opportunity by 98% to be thought of as the drier one than any beyond ones over the most recent 500 years. Outstandingly, a new report for Mahfouz et al. classified 2014's colder time of year as driest one contrasted with the recorded data of the past 56 years [4].

It has been noted thought data analyses from 1951–1975, the occurrence of extreme drought conditions rose twice in the period from 1976–2000 compared with 1950–1982, the period 1983–2014 saw a 60% rise in the occurrence of severe drought conditions [4]. What's more, between the years 2006–2015, Lebanon showed an average estimated ascent of 0.75–1.5 °C contrasted with 1850–1900 throughout the colder time of year season. In the late spring season, it was accounted for a more outrageous ascent of around 1.5–2.25 °C. Specialist has noted between the years 1960–2003 a surmised increment of warm evenings by 27 evenings and abatement cool ones by 23 evenings. Besides, as per the UNDP environmental change profile and the

MOE, an ascent of almost 0.21 °C has been recorded every decade between the years 1970–2006 [4].

With high instability, Lebanon exhibits low precipitation. Soil moisture instability in the summer season is driven mainly by spring rainfall, which leads it to be vulnerable to droughts. These observations well outweigh the predicted natural variability from the North Atlantic Oscillation and are compliant with other research that indicate signs of drought linked to anthropogenic climate change [4].

Through a study that covered the *Cedrus Libani* forests in Syria, scientists have found a notable correlation between the precipitation's quantity, fluctuation in temperatures, and growth of vegetation [40]. It is a continuous dynamic between various factors, where rainfall levels and temperature fluctuation will influence the dry season severity, which at its turn will affect simultaneously how species are distributed and forest development [41]. In addition, by analyzing the dendrochronological data in the Mediterranean, scientists were able to understand the dynamic between tree growth and climatic changes [42–46].

One of the interesting research projects conducted on Cedar forest in Lebanon had reviewed the past present and future of those forest. The study was done through a collection of past geographic, meteorologic, soil and climate data that was processed with the help of the CARAIB model. Finally, the results obtained by the CARAIB model helped predict the future distribution of the *C. Libani* forest where 3 scenarios of atmospheric CO² were tested to mimic potential future global CO² emissions until year 2100. The 3 climate changing scenarios predicted that although the Cedar forest potentially will be growing near same geographical location as current ones, except that it will migrate to higher altitudes. The Lebanese Cedar forest borders expansion, and geographical altitudes migration will depend not only on the Cedars migration potential that is influenced mainly by the abiotic and biotic interventions, but also on the climatic change rhythm that will be taking place in the Mediterranean area especially Lebanon until the end of the 21st century [47]. This study is a clear demonstration on climatological impact on forest distribution, where it highlights Cedar forest migration to higher altitudes, altitudes that will provide these trees with needed temperature to exist and expand.

The climatological changes impacted Lebanese forests allowing speeches to dominate and expand. More specifically, a study covering Bekaa valley was conducted using an interesting approach to understand the biotic response in correlation to climatic changes that were occurring during the past

interglacial-glacial phase through paleoenvironmental remodeling. This study concluded that during the transition phase at a given point tree population such as *C. Libani* were dominant and expanding with existence of temperate deciduous species during favorable climatic conditions rich with precipitation, while this expansion stopped due to inclination of rainfall, impacting coniferous leading to a declination in their population. In addition, the study highlights the re-expansion of conifers at a later stage is probably related to increase in precipitation, yet not enough to allow the revival of temperate deciduous species [48].

As with many countries of the East Mediterranean, climate change affects Lebanon with frequent droughts and intensive desertification, thus the country's forests are highly vulnerable to anthropogenic pressure from urban expansion, agricultural encroachment on forested spots, quarrying, uncontrolled logging, forest fires, invasive species, pollution and soil erosion, as stated by Khater [49]. Most of the region lacks irrigation and nutrients due to erosion processes, and presence of several native species such as the *Cedrus libani* is so reduced that it is currently assessed as Vulnerable in the Red List of Threatened Species [1, 50–52].

The SRLWRP and Lebanon Reforestation Initiative (LRI) projects have addressed this degradation and deforestation challenge since 2012, testing reforestation techniques from United States and Europe to solve issues related to nursery practices and outplanting while evaluating their suitability to Lebanese conditions [16, 53]. Traditional reforestation practices in Lebanon focused on using whatever plant materials were available, completing full payment of seedlings to nurseries upon successful three-year survival of seedlings, outplanting in the post-winter season and employing large-scale mechanical site preparation to loosen rocks and a hoe for the planting hole, making this an intensive labor, economically non-viable and low efficient scheme [54].

These techniques are the outcome of using the target plant concept (TPC) aimed at enhancing survival and growth of seedlings, by emphasizing how seedlings perform on the outplanting site rather than on nursery performance, by establishing a close work between the nursery and the client to determine the target plant based on site characteristics and feedback regarding performance of initial crops, and employing post-planting monitoring information to improve subsequent plant materials [5, 54].

Al-Idrissi was an arabic geographer who lived in 12th century noted pine forest around the Lebanese capital covering an area of more than 3,000 Ha. Later this forest known today as 'Beirut forest' was expanded by Emir Fakhreddine the 2nd, who lived

between the 14–15th century, in addition to his remarkable reforestation efforts that covered different areas of Mount Lebanon [16].

Before Lebanon took its independence in 1943, the reforestation activities were limited to small initiatives done on an individual level by planting some Pine trees. The Lebanese Government initiated the ‘Green Plan’, in order to preserve and regenerate Lebanese forests, where it succeeded to restore a lot of green spaces by planting different types of conifers and hardwoods mainly during the 60s and mid 70s, and by creating national nurseries. In addition, a special consideration was given to Lebanese Cedars in the Shouf mountains [13]. In the early 90s, the Ministry of Environment (MoE) in an effort to create a momentum in reforestation launched what is known by the largest reforestation plan called the National Reforestation Plan (NRP), where in a later stage the Ministry of Agriculture (MoA) played a key role, explicitly managing safeguarded woods and foundation of new timberlands since 2001.

The NRP was divided to short- and long-term plan, ending up covering 100,000 Ha of land where the forest cover will reach a total of 20% [16]. MoE have executed the reforestation of 580 Ha of degraded areas between 2002–2006, by selecting specific sites that are suitable for reforestation according to a set of standards derived from maps that helped with the decision making, in addition to request for reforestation submitted by municipalities. During that time, the reforestation process was monitored by the MoE, but allocated to private firms, including sites maintenance that followed reforestation. The MoE ensured that a variety of Lebanese indigenous species to be used for the reforestation, and selection of species to be determined depending on each site soil, climate, elevation and many other factors [16].

The NRP have established guidelines for reforestation where the seedling used for reforestation must be a minimum of 12–24 month old, planted in nylon bags that holds a volume 1 L of soil, then planted in 50 cm³ holes; In addition, seedlings were irrigated twice within one year of their plantation, and weeding also was done twice a year for the first 2 years of plantation time [16].

Funded by the Global Environment Facility (GEF), the MoE initiated a project that aimed to complement and add more value to the NRP under the name of Safeguarding and Restoring Lebanon’s Woodland Resources Project (SRLWRP). The SRLWRP added more value to the ongoing NRP by using a more efficient management approach, implementation of innovative technologies, reforestation cost reduction approaches, continuous monitoring, and evaluation in addition to

other steps taken towards improving the whole reforestation experience by creating a modern approach under the NRP [16].

Phase 3 of the NRP project was launched in 2010 under the supervision of the MoE with the support of the SRLWR where in order to further develop execution in this stage, the SRLWR proposed another contracting methodology, in view of a participatory methodology of contracting straightforwardly intrigued municipalities to achieve reforestation works in their particular areas, as opposed to contracting private firms and 3rd parties, giving the government a strong grip on the reforestation process. The MoE would choose among municipalities who submitted reforestation requests that aligned with selection criteria set by the SRLWR and MoE, where later on the MoE trained and monitored the bodies who carried the reforestation efforts in each municipality [16]. The MoE with the assist of the SRLWR managed to get on board 48 municipalities between 2010–2011 restoring an area of nearly 200 Ha planted mainly with *Pinus pinea* due to its economic value deriving from selling the pine fruit; In addition not only light was shed inside the Lebanese community on the importance of forests, but also some members were trained on the reforestation methodologies [16].

Reforestation is carried out nowadays through either individual with small initiatives, and official big, organized bodies, such as the Ministry of Agriculture, Ministry of environment, local and international organizations.

The Lebanese Reforestation Initiative (LRI), funded by the United States Agency for International Development (USAID) developed and published a manual under the name of: “A guide to reforestation best practices” in 2014. The target behind publishing that manual is to set the guidelines for best practices in order to implemented in future reforestation activities. Since then, reforestation was carried out in a more effective way. In parallel, 2 technical reports published under the LRI supported by USAID, one in 2015 under the name of “Outplanting monitoring and inspection practices and results” summarizing the results of reforestation efforts done between 2011 and 2014, followed by another one titled “Lebanon reforestation initiative outplanting monitoring report phase2” published in 2019 stating the results of reforestation efforts done in Lebanon between 2016 and 2018.

All reforestation efforts done after 2010 shaped the modern approach of best practices in restoring the forest cover.

Reforestation process starts by a decent site determination system comprises the most important move towards fruitful reforestation. Sites to be chosen and assessed based on ecological, social, and economic factors.

Site determination can begin preceding visiting the site by picking expected areas from a reforestation appropriateness guide, for example, accessing and analyzing data with the help of GIS, a step that can give a better understanding of potential sites in terms of soil composition, climatical conditions, along other data that plays a key role in site selection process. Subsequently, destinations displayed on the maps are those where reforestation can find lasting success from a feasible and scientific perspective. Nonetheless, it is critical to take note of that those guidelines are not definitive, where in some cases the opinion of local people with deep knowledge relative to reforestation can be taken into consideration and in specific situation, they can assist the reforestation chief with looking further into best species to plant [55].

Mainly, the LRI make sure that reforestation is done in either governmental owned locations or religious one, a strategy to better secure the manageability and conservation of the reforested land as well as ensuring that this effort will reflect a public benefit on the whole community within the reforested area [53].

After site selection and verification of ownership, a technical field assessment should follow. The field assessment will be tailored based on the reforestation goals, where it can be done to increase the forest cover, for community strengthening purposes, to restore mine sites, for keep up with the impact of climate changes, and many other objectives [16, 53]. The technical field assessment then will measure the potential site's suitability based on set of standards such as:

- soil depth, where it is important to plant in deep soil (minimum of 0.4 m), otherwise the seedling mortality rate will spike;
- soil types and texture;
- water availability;
- security related matters related to presence of military activity, land mines, or any other factor that may be considered as a security concern for reforestation implementation;
- local community level of interest and degree of engagement, where it is considered as a key factor contributing to the success and sustainability of the reforestation project;
- area accessibility in case any machinery is needed, for irrigation purposes, and for workers' transport;
- the land assessed is preferably to have a relatively big area (>25 Ha);
- land geography in terms of slopes, elevation, and aspect;
- potential human activities that may threaten the seedlings;
- risk of fire in that area;

- grazing pressure, where if any it is important to mitigate that risk by for example putting a fence around the reforested area [16, 53, 55].

The step that follows is species selection, where the choice depends on the outcome from the field assessment, in addition to other factors such as but not limited to economical value, symbolic value, availability at the nurseries and many other [55].

Main step that affects the reforestation process is the quality of the seedling provided by nurseries, where several elements ensure the production of high-quality seedlings such as:

- container selection, where using a Deepots allowed a better management of seedlings, better root system development without swirling, more uniform seedlings, and better management;
- growing media used, where it's a mix of coco-peat and peat most known its water holding capacity, characterized with a specific pH ranging between 5–5.5, and considered cost effective;
- sowing period, where choosing the perfect time for sowing will result in a health strong seedling, and a high percentage of seeds germination;
- a well-managed irrigation system;
- a well-managed fertilization system ensuring that the seedling is strong and healthy and equipped with all nutrients needed for the reforestation process [53].

All the previous steps are followed by holes preparation, where it can be effected manually or with the help of machinery, but what matters the hole dimensions that is mention previously, and both density seedling density and spacing based on the target of reforestation and geographic nature of the land [53, 55]. Seedling will be placed at the hole center and after filling 1/3rd of the hole with soil, it is important that the soil is hand tamped and the process is repeated in thirds and finished by a foot tamped, a way of compacting the soil ensuring no air pockets around the root system and keeping the seedling in place [56]. Watering at this stage or in monitoring stage will depend on soil moisture availability for planted seedlings, but most of the seedlings in Lebanon used for reforestation are watered either by water trucks or a water irrigation system which is better cost-effective option [53, 55].

Final stage, where monitoring and maintenance take place. In this stage, weeds controlling, and irrigation will be done for the first 2 years. In addition, seedling survival will be monitored and will be used as an indicator of the reforestation overall degree of success or failure. At this stage also there will be a lot of lessons learned, a way improves approaches that will be made in future reforestation projects.

NRP reforestations adopted method compared to SRLWRP reforestation enhanced methods [56]

Parameter	NRP reforestation guidelines	SRLWRP reforestation guidelines
Seedling age	12–24 months old	8 months old
Container specs	Nylon bags with a volume of 1 L	Reusable plastic container with a volume of 0.35–0.45 L
Hole dimensions	50 cm ³	20 cm ³
Weeding	Weeding twice a year for first 2 years	Weeding twice a year for first 2 years

Conclusion. It became obvious that climate changes in Lebanon have affected the vegetation cover where it was observed the increase in temperatures, and decrease in precipitations. It is noted that the past of climate change is disturbing the balance of forest ecosystem, where trees became more susceptible to die from insects' attacks, drought, and their slow adaptability past compared to the quickly rising climatic challenges. Based on the Lebanese reforestation experience, it is obvious that reforestation is not an easy task, where a lot of factors are involved and interact together leading to success or failure of the process. It is important to give high attention to details through each step, starting by choice of land, then choice of seedling, followed by planting phase and maintenance

for the couple following year. Everything should be done with high degree of professionalism and great managerial approach to harness successful results of reforestation. In addition, it is important to take into consideration lessons learned from previous reforestation experiences, while keep an open mind to implement and try new promising reforestation techniques that may decrease the seedling mortality rate and bring the whole process to a better cost-efficient level compared to current or old approaches. The level of approached mentioned before will need economic stability, legislation protection, absence of political interfering, and a high level of community awareness and engagement, and till the day Lebanon still faces many of these challenges.

References

1. El-Hajj R., Varese P., Nemer N., Tatoni T., Khater C. Mediterranean ecosystems challenged by global changes and anthropogenic pressures: Vulnerability and adaptive capacity of forests in north Lebanon. *Revue D Ecologie*, 2015, no. 70, pp. 3–15.
2. Merlo M., Croitoru L. Valuing Mediterranean forests: Towards total economic value Wallingford, UK, CABI International, 2005. 406 p.
3. Verner D. Adaptation to a Changing Climate in the Arab Countries: A Case for Adaptation Governance and Leadership in Building Climate Resilience. MENA development report. Washington, DC, World Bank, 2012. 445 p. Available at: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/12216> (accessed 18.08.2022).
4. Naameh S. Anthropogenic Climate Change in Qadisha Valley and Horsh Arz el Rab, Lebanon. Available at: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.28106.59843> (accessed 14.09.2022).
5. Kildisheva O., Aghai M., Bouazza K., Davis A. Improving restoration success through research-driven initiatives: Case studies targeting pinus pinea reforestation stock development in Lebanon. *Plant Ecology*, 2017, vol. 218 (1), pp. 39–53. DOI: 10.1007/s11258-016-0632-7.
6. State and trends of the Lebanese environment. Available at: <http://www.undp.org/lebanon/publications/state-trends-lebanee-enviroment> (accessed 18.08.2022).
7. Tohmé G., Tohmé H. Illustrated flora of Lebanon. Kesrouwan, CNRS Publ., 2014. 612 p.
8. Haroutunian G., Chojnacky D. C., El Riachy R., Chojnacky C. C. Reducing reforestation costs in Lebanon: Adaptive field trials. *Forests*, 2017, vol. 8 (5), pp. 1–18. DOI: 10.3390/f8050169.
9. Marvin W. Mikesell. The Deforestation of Mount Lebanon. *Geographical Review*, 1969, vol. 59 (1), pp. 1–28. DOI: 10.2307/213080.
10. Yasuda Y., Kitagawa H., Nakagawa T. The earliest record of major anthropogenic deforestation in the Ghab Valley, Northwest Syria: a palynological study. *Quaternary International*, 2000, vol. 73, pp. 127–136. DOI: 10.1016/S1040-6182(00)00069-0.
11. El-Hajj R., Al-Jawhary D., Moukaddem T., Khater C. Forest Sustainability in North Lebanon: A Challenging Complexity in a Changing Environment. *International Journal of Forestry Research*, 2014, vol. 1, pp. 1–12. DOI:10.1155/2014/212316.
12. Médail F., Quezél P. Biodiversity hotspots in the Mediterranean basin: Setting global conservation priorities. *Conservation Biology*, 1999, vol. 13 (6), pp. 1510–1513. DOI: /10.1046/j.1523-1739.1999.98467.x.
13. Talhouk S. N., Zurayk R., Khuri S. Conservation of the coniferous forests of Lebanon: Past, present and future prospects. *Орх*, 2001, vol. 35 (3), pp. 206–215. DOI: 10.1046/j.13653008.2001.00180x.

14. Zurayk R., El Moubayid L. Land Degradation and Mitigation in the Lebanese Mountains: The Breakdown of Traditional Systems. Research Paper no. 9. New York, UNDP/DHA, 1994. 92 p. Available at: <https://erc.undp.org/evaluation/documents/download/19920> (accessed 17.08.2022).
15. Mediterranean Environmental Technical Assistance Program. Available at: <https://cordis.europa.eu/project/id/94-USA-B21-PT-00978-MED> (accessed 18.08.2022).
16. Lebanon reforestation initiative. Outplanting monitoring report – phase II. Jdeideh, LRI, 2015. 90 p. Available at: [outplanting-monitoring-report-2019.pdf](#) (accessed 18.08.2022).
17. Sattout E., Nemer N. Managing climate change effects on relic forest ecosystems: A program for Lebanese cedar. *Biodiversity*, 2008, vol. 9, pp. 122–130. DOI: 10.1080/14888386.2008.9712917.
18. Hansen A., Neilson R., Dale V., Flather C., Iverson L., Urrie D., Shafer S., Cook S., Bartlein P. Global change in forests: Responses of species, communities, and biomes. *Bioscience*, 2001, vol. 51 (9), pp. 765–779. DOI: 10.1641/0006-3568(2001)051[0765:GCIFRO]2.0.CO;2.
19. Stolte K. W. Forest health monitoring and forest inventory analysis programs monitor climate change effects in forest ecosystems. *Hum. Ecol. Risk Assessment: An International Journal*, 2001, vol. 7, pp. 1297–1316.
20. National forest and tree assessment and inventory: Final report. FAO, 2005. 112 p. Available at: <http://www.fao.org/forestry/15565-0f921641e230ef06f1d15b8856f2ff07.pdf> (accessed 23.08.2022).
21. Global forest resources assessment 2020: Main report. FAO, 2020. 186 p. Available at: <http://www.fao.org/3/ca9825en/CA9825EN.pdf> (accessed 18.08.2022)
22. Mantyka-Pringle C. S., Martin T. G., Rhodes J. R. Interactions between climate and habitat loss effects on biodiversity: a systematic review and meta-analysis. *Glob. Change Biol.*, 2012, vol. 18, pp. 1239–1252.
23. Brouwers N., Mercer J., Lyons T., Poot P., Veneklaas E., Hardy G. Climate and landscape drivers of tree decline in a Mediterranean ecoregion. *Ecology and Evolution*, 2013, vol. 3, pp. 67–79. DOI: 10.1002/ece3.437.
24. Van Mantgem P. J., Stephenson N. L. Apparent climatically induced increase of tree mortality rates in a temperate forest. *Ecol. Lett.*, 2007, vol. 10, pp. 909–916.
25. Van Mantgem P. J., Stephenson N. L., Byrne J. C., Daniels L. D., Franklin J. F., Fule P. Z., Harmon M. E., Larson A. J., Smith J. M., Taylor A. H., Veblen T. T. Widespread increase of tree mortality rates in the western United States. *Science*, 2009, vol. 323, pp. 521–524.
26. Phillips O. L., Aragao L. E. O. C., Lewis S. L., Fisher J. B., Lloyd J., Lopez-Gonzalez G. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, 2009, vol. 323, pp. 1344–1347.
27. Allen C. D., Macalady A. K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kitzeberger T., Rigling A., Breshears D. D., Hogg E. H., Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J., Allard G., Running S. W., Semerci A., Cobbt N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For. Ecol. Manage.*, 2010, vol. 259, pp. 660–684.
28. Barbeta A., Penuelas J., Ogaya R., Jump A. S. Reduced tree health and seedling production in fragmented *Fagus sylvatica* forest patches in the Montseny Mountains (NE Spain). *For. Ecol. Manage.*, 2011, vol. 261, pp. 2029–2037.
29. Carnicer J., Coll M., Ninyerola M., Pons X., Sanchez G., Penuelas J. Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2011, pp. 5. DOI: 10.1073/pnas.1010070108.
30. Peng C., Ma Z., Lei X., Zhu Q., Chen H., Wang W., Liu S., Li W., Fang X., Zhou X. A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada's boreal forests. *Nature Climate Change*, 2011, vol. 1, pp. 467–471.
31. Huang C.-Y., Anderegg W. R. L. Large drought induced aboveground live biomass losses in southern Rocky Mountain aspen forests. *Glob. Change Biol.*, 2012, vol. 18, pp. 1016–1027. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02592.x.
32. Jump A. S., Mátyás C., Peñuelas J. The altitude-for-latitude disparity in the range retractions of woody species. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, vol. 24 (12), pp. 694–701. DOI: 10.1016/j.tree.2009.06.007.
33. Sarris D., Christodoulakis D., Korner C. Impact of recent climatic change on growth of low elevation eastern Mediterranean forest trees. *Climatic Change*, 2011, vol. 106, pp. 203–223.
34. Dulamsuren C., Hauck M., Leuschner C. Recent drought stress leads to growth reductions in *Larix sibirica* in the western Khentey, Mongolia. *Glob. Change Biol.*, 2010, vol. 16, pp. 3024–3035.
35. Vila-Cabrera A., Martinez-Vilalta J., Vayreda J., Retana J. Structural and climatic determinants of demographic rates of Scots pine forests across the Iberian Peninsula. *Ecol. Appl.*, 2011, vol. 21, pp. 1162–1172.

36. Parry M. L., Canziani O. F., Palutikof J. P., Van Der Linden P. J., Hanson C. E. Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 976 p. Available at: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg2_full_report.pdf (accessed 24.08.2022).
37. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M. M., Miller H. L. Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 996 p. Available at: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf (accessed 24.08.2022).
38. Regato P., Asmar F. Analysis and evaluation of forestation efforts in Lebanon: Expert report. Beirut: Lebanese Ministry of Agriculture, 2011. 59 p.
39. Fourth national report of Lebanon to the convention on biological diversity. Available at: <https://www.cbd.int/doc/world/lb/lb-nr-04-en.pdf> (accessed 24.08.2022).
40. Mahfoud I., Jabbour B., Soulaïman R. Study of long-term climatic changes effects on cedar of Lebanon (*Cedrus libani* a. Rich) stands (Syria) using remote sensing techniques. *Am. J. innov. res.*, 2019, vol. 8 (3), pp. 84–92. Available at: <https://american-jiras.com/Ilene-ManuscriptRef.1-ajira010319.pdf> (accessed 18.08.2022).
41. Jalab A., Mahfoud I., Ismaïel F. Temperature and rainfall changes in Lattakia, Kasaab and Slenfeh during 1978-2011. *Tishreen Univ. J. for Res. and Sc. Stud.*, 2014, vol. 36 (3), pp. 286–303. Available at: <https://shamra.sy/academia/show/57e2e150d8bf2#> (accessed 17.08.2022).
42. Andreu L., Gutie'rrrez E., Macias M., Ribas M., Bosch O., Camarero J. J. Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests. *Global Change Biol.*, 2007, vol. 13, pp. 1–12.
43. Bogino S. M., Bravo F. Growth response of *Pinus pinaster* Ait. to climatic variables in central Spanish forests. *Ann. For. Sci.*, 2008, vol. 65 (5), pp. 1–13.
44. Linares J. C., Tiscar P. Climate change impacts and vulnerability of the southern populations of *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*. *Tree Physiol.*, 2010, vol. 30, pp. 795–806.
45. Gea-Izquierdo G., Cherubini P., Canellas I. Tree-rings reflect the impact of climate change on *Quercus ilex* L. along a temperature gradient in Spain over the last 100 years. *For. Ecol. Manag.*, 2011, vol. 262, pp. 1807–1816.
46. Río M., Rodríguez-Alonso J., Bravo-Oviedo A., Ruiz-Peinado R., Cañellas I., Gutiérrez E. Aleppo pine vulnerability to climate stress is independent of site productivity of forest stands in southeastern Spain. *Trees*, 2014, vol. 28 (4), pp. 1209–1224. DOI:10.1007/s00468-014-1031-0.
47. Hajar L., François L., Khater C., Jomaa I., Déqué M., Cheddadi R. *Cedrus libani* (A. Rich) distribution in Lebanon: Past, present and future. *Comptes Rendus Biologies*, 2010, vol. 333 (8), pp. 622–630. DOI: 10.1016/j.crvi.2010.05.003.
48. Jeffers D., Willis K. J. Vegetation response to climate change during the Last Interglacial–Last Glacial transition in the southern Bekaa Valley, Lebanon. *Palynology*, 2014, vol. 38(2), pp. 195–206. Available at: <https://doi.org/10.1080/01916122.2014.880958> (accessed 24.09.2022).
49. Khater C., El-Hajj R. Terrestrial biodiversity in Lebanon. *Review and perspectives of environmental studies in Lebanon: National Council for Scientific Research*, 2012, pp. 141–169. Available at: https://www.researchgate.net/publication/257374942_Terrestrial_Biodiversity_In_Lebanon (accessed 23.09.2022).
50. Haktanir K., Karaca A., Omar S. M. The prospects of the impact of desertification on Turkey, Lebanon, Syria and Iraq. *Environmental challenges in the Mediterranean 2000–2050*. Springer Dordrecht, 2004, pp. 139–154.
51. IUCN red list of threatened species: *Cedrus libani*. Available at: <https://www.iucnredlist.org/en> (accessed 25.09.2022).
52. Zdruli P., Pagliai M., Kapur S., Faz Cano A. Land Degradation and Desertification: Assessment, Mitigation and Remediation. Springer Publ., 2010. 660 p. DOI:10.1007/978-90-481-8657-0.
53. Native tree nurseries culturing practices and results. USFS/LRI, 2014, 23 p. Available at: <https://api.lri-lb.org/Content/uploads/resourcepublications/Native-Tree-Nurseries-Culturing-Practices-and-Results.pdf> (accessed 24.09.2022).
54. Dumroese R. K., Landis T., Pinto J., Haase D., Wilkinson K., Davis A. Meeting forest restoration challenges: Using the target plant concept. *Reforesta*, 2016, no. 1, pp. 37–52. DOI: 10.21750/REFOR.1.03.3.
55. A Guide to Reforestation Best Practices. USFS/LRI, 2014. 43 p. Available at: <https://project.lri-lb.org/sites/default/files/AGuidetoReforestationBestPractices.pdf> (accessed 23.09.2022).
56. Safeguarding and restoring Lebanon's woodland resources: technical report. UNDP, 2014. 109 p. Available at: https://www.lb.undp.org/content/lebanon/en/home/library/environment_energy/safeguarding-and-restoring-lebanons-woodland-resources-technical.html (accessed 24.09.2022).

Список литературы

1. Mediterranean ecosystems challenged by global changes and anthropogenic pressures: Vulnerability and adaptive capacity of forests in north Lebanon / R. El-Hajj [et al.] // *Revue D Ecologie*. 2015. No. 70. P. 3–15.
2. Merlo M., Croitoru L. Valuing Mediterranean forests: Towards total economic value. Wallingford, UK: CABI International, 2005. 406 p.
3. Verner D. Adaptation to a Changing Climate in the Arab Countries: A Case for Adaptation Governance and Leadership in Building Climate Resilience. MENA development report. Washington, DC: World Bank, 2012. 445 p. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/12216> (date of access: 18.08.2022).
4. Naameh S. Anthropogenic Climate Change in Qadisha Valley and Horsh Arz el Rab, Lebanon // *ResearchGate*. URL: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.28106.59843> (date of access 14.09.2022).
5. Improving restoration success through research-driven initiatives: Case studies targeting pinus pinea reforestation stock development in Lebanon / Kildisheva O. [et al.] // *Plant Ecology*. 2017. Vol. 218 (1). P. 39–53. DOI: 10.1007/s11258-016-0632-7.
6. State and trends of the Lebanese environment // UNDP. Lebanon. URL: <http://www.undp.ordlebanon/publications/state-trends-lebanese-environment> (date of access: 18.08.2022).
7. Tohmé G., Tohmé H. Illustrated flora of Lebanon. Kesrouwa: CNRS, 2014. 612 p.
8. Reducing reforestation costs in Lebanon: Adaptive field trials / G. Haroutunian [et al.] // *Forests*. 2017. Vol. 8 (5). P. 1–18. DOI: 10.3390/f8050169.
9. Marvin W. Mikesell. The Deforestation of Mount Lebanon // *Geographical Review*. 1969. Vol. 59 (1). P. 1–28. DOI: 10.2307/213080.
10. Yasuda Y., Kitagawa H., Nakagawa T. The earliest record of major anthropogenic deforestation in the Ghab Valley, Northwest Syria: a palynological study // *Quaternary International*. 2000. Vol. 73. P. 127–136. DOI: 10.1016/S1040-6182(00)00069-0.
11. Forest Sustainability in North Lebanon: A Challenging Complexity in a Changing Environment / R. El-Hajj [et al.] // *International Journal of Forestry Research*. 2014. Vol. 1. P. 1–12. DOI: 10.1155/2014/212316.
12. Médail F., Quezél P. Biodiversity hotspots in the Mediterranean basin: Setting global conservation priorities // *Conservation Biology*. 1999. Vol. 13 (6). P. 1510–1513. DOI: 10.1046/j.1523-1739.1999.98467.x.
13. Talhouk S. N., Zurayk R., Khuri S. Conservation of the coniferous forests of Lebanon: Past, present and future prospects // *Oryx*. 2001. Vol. 35 (3). P. 206–215. DOI: 10.1046/j.13653008.2001.00180x.
14. Zurayk R., El Moubayid L. Land Degradation and Mitigation in the Lebanese Mountains: The Breakdown of Traditional Systems. Research Paper no. 9. New York: UNDP/DHA, 1994. 92 p. URL: <https://erc.undp.org/evaluation/documents/download/19920> (date of access: 17.08.2022).
15. Mediterranean Environmental Technical Assistance Program. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/94-USA-B21-PT-00978-MED> (date of access 18.08.2022).
16. Lebanon reforestation initiative. Outplanting monitoring report – phase II. Jdeideh: LRI, 2015. 90 p. URL: outplanting-monitoring-report-2019.pdf (date of access: 18.08.2022).
17. Sattout E., Nemer N. Managing climate change effects on relic forest ecosystems: A program for lebanese cedar // *Biodiversity*. 2008. Vol. 9. P. 122–130. DOI: 10.1080/14888386.2008.9712917.
18. Global change in forests: Responses of species, communities, and biomes / A. Hansen [et al.] // *Bioscience*. 2001. Vol. 51 (9). P. 765–779. DOI: 10.1641/0006-3568(2001)051 [0765:GCIFRO]2.0.CO;2.
19. Stolte K. W. Forest health monitoring and forest inventory analysis programs monitor climate change effects in forest ecosystems // *Hum. Ecol. Risk Assessment: An International Journal*. 2001. Vol. 7. P. 1297–1316.
20. National forest and tree assessment and inventory: Final report. FAO, 2005. 112 p. URL: <http://www.fao.org/forestry/15565-0f921641e230ef06f11d15b8856f2ff07.pdf> (date of access: 23.08.2022).
21. Global forest resources assessment 2020: Main report. FAO, 2020. 186 p. URL: <http://www.fao.org/3/ca9825en/CA9825EN.pdf> (date of access: 18.08.2022)
22. Mantyka-Pringle C. S., Martin T. G., Rhodes J. R. Interactions between climate and habitat loss effects on biodiversity: a systematic review and meta-analysis // *Glob. Change Biol*. 2012. Vol. 18. P. 1239–1252.
23. Climate and landscape drivers of tree decline in a Mediterranean ecoregion / N. Brouwers [et al.] // *Ecology and Evolution*. 2013. Vol. 3. P. 67–79. DOI: 10.1002/ece3.437.
24. Van Mantgem P. J., Stephenson N. L. Apparent climatically induced increase of tree mortality rates in a temperate forest // *Ecol. Lett*. 2007. Vol. 10. P. 909–916.

25. Widespread increase of tree mortality rates in the western United States / P. J. Van Mantgem [et al.] // *Science*. 2009. Vol. 323. P. 521–524.
26. Drought sensitivity of the Amazon rainforest / O. L. Phillips [et al.] // *Science*. 2009. Vol. 323. P. 1344–1347.
27. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests / C. D. Allen [et al.] // *For. Ecol. Manage.* 2010. Vol. 259. P. 660–684.
28. Reduced tree health and seedling production in fragmented *Fagus sylvatica* forest patches in the Montseny Mountains (NE Spain) / A. Barbeta [et al.] // *For. Ecol. Manage.* 2011. Vol. 261. P. 2029–2037.
29. Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought / J. Carnicer [et al.] // *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2011. P. 5. DOI: 10.1073/pnas.1010070108.
30. A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada's boreal forests / C. Peng [et al.] // *Nature Climate Change*. 2011. Vol. 1. P. 467–471.
31. Huang C.-Y., Anderegg W. R. L. Large drought induced aboveground live biomass losses in southern Rocky Mountain aspen forests // *Glob. Change Biol.* 2012. Vol. 18. P. 1016–1027. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02592.x.
32. Jump A. S., Mátyás C., Peñuelas J. The altitude-for-latitude disparity in the range retractions of woody species // *Trends in Ecology & Evolution*. 2009. Vol. 24 (12). P. 694–701. DOI: 10.1016/j.tree.2009.06.007.
33. Sarris D., Christodoulakis D., Korner C. Impact of recent climatic change on growth of low elevation eastern Mediterranean forest trees // *Climatic Change*. 2011. Vol. 106. P. 203–223.
34. Dulamsuren C., Hauck M., Leuschner C. Recent drought stress leads to growth reductions in *Larix sibirica* in the western Khentey, Mongolia // *Glob. Change Biol.* 2010. Vol. 16. P. 3024–3035.
35. Structural and climatic determinants of demographic rates of Scots pine forests across the Iberian Peninsula / A. Vila-Cabrera [et al.] // *Ecol. Appl.* 2011. Vol. 21. P. 1162–1172.
36. *Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / M. L. Parry [et al.]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 976 p. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg2_full_report.pdf (date of access 24.08.2022).
37. *Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / S. Solomon [et al.]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 996 p. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf (date of access: 24.08.2022).
38. Regato P., Asmar F. Analysis and evaluation of forestation efforts in Lebanon: Expert report. Beirut: Lebanese Ministry of Agriculture, 2011. 59 p.
39. Fourth national report of Lebanon to the convention on biological diversity. URL: <https://www.cbd.int/doc/world/lb/lb-nr-04-en.pdf> (date of access: 24.08.2022).
40. Mahfoud I., Jabbour B., Soulaïman R. Study of long-term climatic changes effects on cedar of Lebanon (*Cedrus libani* a. Rich) stands (Syria) using remote sensing techniques // *Am. J. Innov. Res.* 2019. Vol. 8 (3). P. 84–92. URL: <https://american-jiras.com/Ilene-ManuscriptRef.1-ajira010319.pdf> (date of access: 18.08.2022).
41. Jalab A., Mahfoud I., Ismaïel F. Temperature and rainfall changes in Lattakia, Kasaab and Slenfeh during 1978-2011 // *Tishreen Univ. J. for Res. and Sc. Stud.* 2014. Vol. 36 (3). P. 286–303. URL: <https://shamra.sy/academia/show/57e2e150d8bf2#> (date of access: 17.08.2022).
42. Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests / L. Andreu [et al.] // *Global Change Biol.* 2007. Vol. 13. P. 1–12.
43. Bogino S. M., Bravo F. Growth response of *Pinus pinaster* Ait. to climatic variables in central Spanish forests // *Ann. For. Sci.* 2008. Vol. 65 (5). P. 1–13.
44. Linares J.C., Tiscar P. Climate change impacts and vulnerability of the southern populations of *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* // *Tree Physiol.* 2010. Vol. 30. P. 795–806.
45. Gea-Izquierdo G., Cherubini P., Canellas I. Tree-rings reflect the impact of climate change on *Quercus ilex* L. along a temperature gradient in Spain over the last 100 years // *For. Ecol. Manag.* 2011. Vol. 262. P. 1807–1816.
46. Aleppo pine vulnerability to climate stress is independent of site productivity of forest stands in south-eastern Spain / M. Río [et al.] // *Trees*. 2014. Vol. 28 (4). P. 1209–1224. DOI: 10.1007/s00468-014-1031-0.
47. *Cedrus libani* (A. Rich) distribution in Lebanon: Past, present and future / L. Hajar [et al.] // *Comptes Rendus Biologies*. 2010. Vol. 333 (8). P. 622–630. DOI: 10.1016/j.crv.2010.05.003.
48. Jeffers D., Willis K. J. Vegetation response to climate change during the Last Interglacial – Last Glacial transition in the southern Bekaa Valley, Lebanon // *Palynology*. 2014. Vol. 38 (2). P. 195–206. DOI: 10.1080/01916122.2014.880958.

49. Khater C., El-Hajj R. Terrestrial biodiversity in Lebanon // Review and perspectives of environmental studies in Lebanon: National Council for Scientific Research, 2012. P. 141–169. URL: https://www.researchgate.net/publication/257374942_Terrestrial_Biodiversity_In_Lebanon (date of access: 23.09.2022).

50. Haktanir K., Karaca A., Omar S. M. The prospects of the impact of desertification on Turkey, Lebanon, Syria and Iraq // Environmental challenges in the Mediterranean 2000–2050. Springer Dordrecht, 2004. P. 139–154.

51. IUCN red list of threatened species: *Cedrus libani*. URL: <https://www.iucnredlist.org/en> (date of access: 25.09.2022).

52. Land Degradation and Desertification: Assessment, Mitigation and Remediation / P. Zdruli [et al.]. Springer Publ., 2010. 660 p. DOI: 10.1007/978-90-481-8657-0.

53. Native tree nurseries culturing practices and results. USFS/ LRI, 2014. 23 p. URL: <https://api.lri-lb.org/Content/uploads/resourcepublications/Native-Tree-Nurseries-Culturing-Practices-and-Results.pdf> (date of access: 24.09.2022).

54. Meeting forest restoration challenges: Using the target plant concept / Dumroese R. K. [et al.] // Reforesta. 2016. No. 1. P. 37–52. DOI: 10.21750/REFOR.1.03.3.

55. A Guide to Reforestation Best Practices. USFS/LRI, 2014. 43 p. URL: <https://project.lri-lb.org/sites/default/files/AGuidetoReforestationBestPractices.pdf> (date of access: 23.09.2022).

56. Safeguarding and restoring Lebanon's woodland resources: technical report. UNDP, 2014. 109 p. URL: https://www.lb.undp.org/content/lebanon/en/home/library/environment_energy/safeguarding-and-restoring-lebanons-woodland-resources-technical.html (date of access 24.09.2022).

Information about the authors

Nosnikov Vadim Valer'evich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Assistant Professor of 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

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: michelalalam@gmail.com

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

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

Received 13.10.2022

УДК 630*233

А. В. Юрения, Н. И. Якимов, Е. Г. Юрения

Белорусский государственный технологический университет

АДАПТАЦИЯ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ ПРИ ЛЕСНОЙ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ИЛОВОГО ПРУДА УП «МИНСКВОДОКАНАЛ»

Целью работы являлось исследование адаптации древесно-кустарниковой растительности при рекультивации иловых прудов, которые оказывают значительное влияние на окружающую среду. Лесная рекультивация пруда-накопителя позволит уменьшить эмиссию газов в атмосферный воздух, а также сократить поверхность испарения с территории пруда. Основным показателем адаптации растений к условиям новой среды служит их сохранность, которая показывает процент сохранившихся растений к числу посаженных. Для создания твердого основания на поверхность илового пруда был нанесен минеральный остаток песка из песколовков, который образовался в процессе очистки сточных вод на очистных сооружениях. Результаты определения содержания тяжелых металлов в почвогрунте свидетельствует о том, что все исследованные пробы отвечают требованиям данных технических условий в части содержания тяжелых металлов. В наибольшем количестве в анализируемых пробах присутствуют цинк, хром, медь и отсутствуют мышьяк, кадмий, ртуть. Поверхность илового пруда была подвержена лесной рекультивации различными древесными видами. Опытные посадки были оценены по сохранности в зависимости от наличия на деревьях листьев и жизнеспособных почек. В результате адаптации к экстремальным условиям произрастания некоторые лиственные виды имели показатель сохранности в текущем году более высокий по сравнению с предыдущим годом, за счет восстановления облиствения и возобновления роста из спящих почек.

Ключевые слова: иловый пруд, лесные культуры, сохранность древесных растений, посадочный материал с открытой и закрытой корневыми системами.

Для цитирования: Юрения А. В., Якимов Н. И., Юрения Е. Г. Адаптация древесных растений при лесной рекультивации илового пруда УП «Минскводоканал» // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 34–40. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-04.

A. V. Yurennya, N. I. Yakimov, E. G. Yurennya

Belarusian State Technological University

ADAPTATION OF WOODY PLANTS DURING FOREST RECLAMATION OF SILT POND UNITARY ENTERPRISE “MINSK Vodokanal”

The aim of the work was to study the adaptation of tree and shrub vegetation during the reclamation of silt ponds, which have a significant impact on the environment. Forest reclamation of the storage pond will reduce the emission of gases into the atmospheric air, as well as reduce the evaporation surface from the pond area. The main indicator of the adaptation of plants to the conditions of the new environment is their safety, which shows the percentage of surviving plants to the number of planted. To create a solid foundation, the surface of the sludge pond was covered with the mineral residue of sand from sand traps, which is formed in the process of wastewater treatment at wastewater treatment plants. The results of determining the content of heavy metals in the soil testifies that all the studied samples meet the requirements of these technical conditions in terms of the content of heavy metals. Zinc, chromium, copper are present in the greatest amount in the analyzed samples, and arsenic, cadmium, and mercury are absent. The surface of the silt pond was subject to forest reclamation with various tree species. Experimental plantings were evaluated for safety, depending on the presence of leaves and viable buds on the trees. As a result of adaptation to extreme growing conditions, some deciduous species had a higher survival rate in the current year compared to the previous year, due to the restoration of foliage and resumption of growth from dormant buds.

Keywords: silt pond, forest crops, preservation of woody plants, planting material with open and closed root system.

For citation: Yurennya A. V., Yakimov N. I., Yurennya E. G. Adaptation of woody plants during forest reclamation of silt pond unitary enterprise “Minsk Vodokanal”. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 34–40. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-04 (In Russian).

Введение. Целью работы являлось исследование адаптации древесно-кустарниковой растительности при рекультивации прудов-накопителей, оказывающих наибольшее влияние на формирование выбросов в атмосферный воздух. Это позволило сформировать полосу ландшафтных древесных культур для уменьшения эмиссии газов в атмосферный воздух, а также сократить поверхность испарения за счет лесной рекультивации пруда-накопителя.

Основным показателем адаптации растений к условиям новой среды служит их сохранность, которая показывает процент выживших растений к числу посаженных. Сохранность является важным показателем, который характеризует состояние лесных культур.

Многие авторы отмечают, что наиболее активным способом лесовосстановления древесных пород на площадях с неблагоприятными условиями произрастания является создание лесных культур [1–3]. Для таких лесорастительных условий должен быть обоснован правильный подбор лесных пород. Например, робиния лжеакация и береза повислая считаются древесными породами, лучше всего подходящими для облесения меловых отвалов [4]. В условиях типчаково-ковыльной степи наиболее перспективными являются лесные культуры тополя белого, дерена белого, вяза приземистого, ивы белой и жимолости татарской с показателями сохранности 78,9; 75,0; 74,4; 73,6 и 72,8% соответственно [5].

Сохранность изменяется с возрастом лесных культур. Исследования показали, что сохранность лесных культур сосны корейской в первый год составляет 27,0–89,0%, в третий год от 25,4 до 87,1%, на пятый год результаты показывают сохранность в пределах 21,3–84,2%. Исследования в 30-летних культурах показали сохранность от 15,3 до 64,1% [6].

Сохранность зависит от вида посадочного материала. При создании лесных культур посадочным материалом с закрытой корневой системой высаженные растения лучше приживаются на новом месте и практически по всем биометрическим показателям на первый год жизни превосходят лесные культуры, созданные посадочным материалом с открытой корневой системой. Они меньше испытывают послепосадочную депрессию и адаптация их является более успешной [7].

Влияние на сохранность оказывает также вид древесной породы. В 5-летних культурах на одном и том же участке сосна обыкновенная имеет сохранность от 87,3%, ель сибирская – 69,3%, липа мелколистная – 77,5%, лох узколистный – 77,9%, дуб черешчатый – 54,0% [8].

Сохранность также зависит от содержания токсичных элементов в почве. Выявлено, что

содержание хлора в почве около 0,006% от сухой почвы не является токсичным и не влияет на рост и приживаемость тополей. При содержании хлора 0,037% сосна обыкновенная имеет угнетенный вид либо погибает. При содержании хлора 0,017% растения были в хорошем состоянии и имели высокую сохранность [9].

В неблагоприятных условиях илового пруда-накопителя правильный выбор древесных пород для лесной рекультивации имеет большое значение. Высокую сохранность в этих условиях показали лиственные породы по сравнению с хвойными видами [10, 11]. По данным некоторых авторов, лиственные породы образуют в почве мягкий гумус, лесная подстилка лиственных пород уменьшает промерзание почвы, защищает почву от чрезмерного испарения влаги и сильного нагревания, сохраняет почвенные капилляры, способствует превращению поверхностного стока воды во внутрипочвенный, служит источником обогащения грунта питательными веществами [12].

Основная часть. В результате технического этапа рекультивации на поверхности илового пруда был внесен минеральный остаток песка из песколовок, образующийся в процессе очистки сточных вод на очистных сооружениях канализации, выдержанный на песковых площадках в течение двух месяцев. Песок из песколовок вносился на поверхность илового пруда перед посадкой разных видов древесных растений и кустарников, что обеспечивало увеличение твердости смесей (почвогрунта) в верхнем слое до 50 см с 10 до 25 кг/см².

Результаты исследований химического состава почвогрунта показали, что, как и в почве, на первом месте по преобладанию стоит кислород, на втором кремний, затем алюминий, железо, кальций, магний и др. Содержание фосфора значительно выше содержания, характерного для почв. Также выше среднего содержание серы. Аналогичная тенденция характерна для микроэлементов, которые в исследуемых пробах содержатся в значительно больших количествах, чем в почве. Причем содержание микроэлементов уменьшается с увеличением глубины. Сравнение результатов определения содержания тяжелых металлов в исследуемых пробах с требованиями технических условий свидетельствует о том, что все исследованные пробы отвечают нормативам в части содержания тяжелых металлов. В наибольшем количестве в анализируемых пробах присутствуют цинк, хром, медь, но отсутствуют мышьяк, кадмий, ртуть. Сравнение содержания тяжелых металлов в исследованных пробах с действующими в Беларуси нормативами предельно допустимых концентраций показывает, что по хрому в отдельных

пробах наблюдается более чем 4-кратное превышение допустимого уровня, а по цинку допустимый уровень превышен более чем в 10 раз. Однако, учитывая то, что пруды-накопители имеют водонепроницаемое основание, проникновение тяжелых металлов в подземные воды исключено.

Плодородие почвы или субстрата определяется запасом элементов питания для древесных растений. Агрохимический анализ грунта участка показал, что содержание гумуса на участке изменяется в широких пределах (от 1,60 до 6,53%), что обусловлено внесением различных типов грунтосмесей на участок и различной степенью разложения органического вещества. Среднее содержание гумуса по смешанным образцам верхнего горизонта составило 3,1%, что говорит о достаточной степени обеспеченности. Однако встречаются участки, где его содержание составляет менее 2%. Содержание подвижных форм фосфора имеет довольно большую изменчивость по участку (от 4,6 до 14,1 мг на 100 г грунта) и в среднем составляет 8,5 мг на 100 г грунта, что характеризует ее как среднеобеспеченную для растений. Содержание обменных форм калия также имеет довольно большую динамику по участку (от 3,6 до 12,7 мг на 100 г грунта) и в среднем составляет 6,4 мг на 100 г грунта, что характеризует ее как среднеобеспеченную для растений.

Кислотность грунтов довольно низкая, реакция среды близка к нейтральной (рН по смешанным образцам на участке составляет от 6,4 до 7,2), в среднем она составила 6,8. Для выращивания большинства древесных пород такая реакция среды грунтов является завышенной,

что может сказаться на приживаемости и росте древесных растений, особенно в первые годы. Большинство древесных видов предпочитают слабокислые почвы и хорошо растут при кислотности почвы 5–6 рН. Величина рН на глубине 20–50 см близка к верхнему слою грунта и составляет в среднем 6,7, что является также низким для выращивания древесных и кустарниковых растений. Низкая кислотность может негативно сказаться на приживаемости древесных растений. Такой показатель рН в первую очередь связан с высоким содержанием обменных оснований кальция и магния в грунте. По степени обеспеченности подвижным фосфором и обменным калием грунты имеют среднюю величину, что будет достаточным для выращивания древесных растений.

Опытные посадки были оценены по сохранности в зависимости от наличия на деревьях листьев и жизнеспособных почек. Однако некоторые деревья и кустарники в период вегетации часто сбрасывали листву в связи с неблагоприятными условиями роста, поэтому они учитывались как погибшие растения. Особенно часто это отмечалось у клена остролистного и кустарников. Растения постепенно приспособились к экстремальным условиям произрастания, и в текущем году некоторые виды за счет возобновления роста из спящих почек внизу стволика имели более высокую сохранность, чем в предыдущем году. Эти растения снова возобновили свое развитие, и сохранность посадок частично увеличилась.

Результаты учета сохранности опытных посадок на третий год роста на территории илового пруда № 4 приведены в табл. 1.

Таблица 1
Сохранность древесных видов, посаженных саженцами с открытой корневой системой, на территории илового пруда-накопителя № 4 на третий год после посадки

Древесный вид	Посажено, шт.	Сохранилось в 2022 г, шт.	Сохранность, %	
			2021 г.	2022 г.
Береза повислая	605	121	32,7	20,0
Пузыреплодник калинолистный	600	147	21,5	24,5
Клен остролистный	1381	824	57,3	59,7
Липа крупнолистная	160	51	35,6	31,9
Кизильник блестящий	60	4	1,7	6,7
Дерен белый	60	15	21,7	25,0
Боярышник обыкновенный	90	51	36,7	56,7
Дуб северный	120	6	4,2	5,0
Ель европейская	300	3	1,0	1,0
Сирень обыкновенная	110	20	18,2	18,2
Бирючина обыкновенная	60	1	3,3	1,7
Рябина обыкновенная	60	13	16,7	21,7
Сосна обыкновенная	300	1	0,3	0,3
Шиповник	60	5	–	8,3

В целом сохранность березы повислой в текущем году снизилась на 12,7% за счет отпада высаженных молодых растений, которыми дополнялись посадки в прошлом году. Однако растения березы, которые прижились три года назад, продолжали активный рост и оказались довольно устойчивыми к сложным условиям произрастания. У липы крупнолистной снизилась сохранность на 3,7%.

Сохранность клена остролистного наоборот увеличилась на 2,4% за счет появления побегов в нижней части стволика и возобновления роста. По сравнению с прошлым годом отмечается постепенное восстановление угнетенных экземпляров дуба северного – на 0,8%, рябины обыкновенной – на 5%.

Также увеличилась сохранность кустарниковых пород, таких как пузыреплодник калинолистный – на 3%, кизильник блестящий – на 5%, дерен белый – на 3,3%. Боярышник обыкновенный сохранил свою жизнеспособность в прикорневой зоне и в результате даже увеличил сохранность на 20%. Аналогично проявил себя шиповник, который в предыдущем году практически отпал, а в нынешнем году тронулось в рост 8,3% растений. Это говорит о том, что происходит адаптация древесных пород к сложным почвенно-грунтовым условиям. Также на опытном участке появилось в небольшом количестве естественное возобновление осины, ивы и смородины.

Особенности изменения сохранности древесных пород, посаженных сеянцами с закрытой корневой системой, определялась в течение весенне-летнего периода с момента начала массового распускания листьев на лиственных породах и почек на хвойных видах, а также по наличию зеленой хвои на сосне обыкновенной и ели европейской.

Сохранность посадок, созданных посадочным материалом с закрытой корневой системой, незначительно снизилась по сравнению с предыдущим годом. В табл. 2 представлены результаты сохранности древесных пород, созданных посадочным материалом с закрытой корневой системой.

Как видно из табл. 2, сохранность посадок сосны обыкновенной снизилась на 5,5%, ели европейской – на 7,9%. Ольха черная с закры-

той корневой системой в целом имеет низкую сохранность, которая уменьшилась за год на 21,9%. Однако некоторые растения березы повислой, сбросив листья в предыдущем году, отреагировали на сложные условия произрастания, через год восстановили жизнеспособность и активизировали рост. Так, сохранность березы повислой в целом увеличилась на 6,3% по сравнению с предыдущим экспериментальным годом.

По сохранности растений судят об устойчивости их к заглушению травянистой растительностью и к другим неблагоприятным факторам среды. Чем крупнее посадочный материал, обладающий оптимальным соотношением массы мелких корней к надземной части, с большим диаметром и высотой посадочного материала, тем он более устойчив в посадках. Поэтому с целью улучшения адаптации к условиям илового пруда за посадками необходимо проводить уход путем скашивания травянистой растительности через 2–3 недели. Задачи ухода заключаются в создании благоприятных условий для роста и развития посаженных лесных растений. Основным видом ухода является борьба с травянистой растительностью. Удаление травянистой растительности предохраняет лесные культуры от заглушения и снижает расход запасов влаги и питательных веществ в почве.

В условиях иловых прудов при обработке почвы ямками уход должен проводиться с помощью мотокос. При этом вокруг каждого посаженного растения оставляется защитная полоса шириной 10–15 см, а в междурядьях и в рядах производится сплошное скашивание травянистой растительности. Защитная полоса вокруг деревьев оставляется для того, чтобы избежать повреждения их стволиков при скашивании травы.

Количество уходов, их интенсивность, сроки и длительность проведения определяются почвенно-грунтовыми условиями, целевым назначением, состоянием, возрастом и составом лесных культур, биологическими особенностями древесных и кустарниковых видов, способом и качеством обработки почвы, составом травянистой растительности и другими факторами.

Таблица 2

Сохранность опытных посадок, созданных сеянцами с закрытой корневой системой

Древесный вид	Посажено, шт.	Сохранилось, шт.		Сохранность, %	
		2021 г.	2022 г.	2021 г.	2022 г.
Сосна обыкновенная	351	274	255	78,1	72,6
Ель европейская	165	141	128	85,5	77,6
Береза повислая	48	29	32	60,4	66,7
Ольха черная	32	10	3	31,3	9,4

Для правильного выбора вида и срока проведения ухода необходимо знать закономерности роста выращиваемых древесных видов, а также динамику и степень развития травянистой растительности в конкретных почвенных условиях. У большинства лесообразующих древесных видов прирост древесных побегов в высоту формируется в начале вегетационного периода. Рост в высоту продолжается непродолжительное время и составляет у сосны и ели 35–45, а у лиственных пород 80–90 дней. По диаметру все древесные виды растут в течение всего вегетационного периода. Поэтому начинать уход необходимо с середины мая и заканчивать в конце августа. Наиболее опасный период, в котором происходит заглушение травянистой растительностью посаженных семян и саженцев, – это июнь. Поэтому необходимо проводить наблюдения за развитием травянистой растительности в течение вегетационного периода, намечать уход сразу после превышения высоты семян и повторять при последующем отрастании трав. При достижении древесными растениями высоты 1,5–2 м уход можно прекращать.

Заключение. Основным показателем адаптации растений к условиям новой среды служит их сохранность, которая определяется отношением числа сохранившихся растений к числу посаженных и выражается в процентах. На сохранность древесных растений в неблагоприятных условиях произрастания влияют

многие факторы. Это вид древесной породы, возраст посадочного материала, содержание токсичных элементов в почве, уход за посаженными культурами и др. Сохранность опытных посадок оценивалась в зависимости от наличия на деревьях листьев и жизнеспособных почек. Поэтому при учете сохранности деревьев без листьев и жизнеспособных почек учитывались как погибшие. По мере приспособления к экстремальным условиям произрастания некоторые виды (клен остролистный, рябина обыкновенная, боярышник, шиповник) за счет возобновления роста из спящих почек в нижней части стволика увеличили свою сохранность. Хвойные породы, посаженные сеянцами с закрытой корневой системой, снизили сохранность по сравнению с предыдущим годом. Часть сеянцев березы повислой прореагировала на неблагоприятные факторы среды путем сбрасывания листьев. Однако через год они восстановили облиствление и их сохранность увеличилась. В критических экологических условиях в первые годы жизни молодых деревьев большое влияние на сохранность имеют уход за древесными растениями. Наиболее опасный период, в котором происходит заглушение травянистой растительностью посаженных семян и саженцев, – это июнь. Начинать уход путем скашивания сорной растительности необходимо с середины мая и заканчивать в конце августа.

Список литературы

1. Родин А. Р. Лесные культуры. М.: МГУЛ, 2002. 268 с.
2. Писаренко А. И., Мерзленко М. Д. Создание искусственных лесов. М.: Агропромиздат, 1990. 270 с.
3. Романов Е. М., Еремин Н. В., Нуреева Т. В. Искусственное лесовосстановление: мониторинг и повышение эффективности // Лесное хоз-во. 2008. № 1. С. 31–33.
4. Деденко Т. П., Талашук Л. Г. Рост и состояние робинии лжеакация и березы повислой в различных эдафических условиях техногенно-нарушенных земель // Биоразнообразие и устойчивость естественных и искусственных растительных сообществ: материалы Всерос. молодежной науч.-практ. конф., Воронеж, 13–15 апр. 2022 г. Воронеж, 2022. С. 22–26.
5. Рахимжанов А. Н., Залесов С. В., Зарубина Л. В. Анализ сохранности лесных культур в типчаково-ковыльной степи Северного Казахстана // Леса России и хозяйство в них. 2019. № 1 (68). С. 11–18.
6. Розломий Н. Г., Плужник М. А. Динамика сохранности лесных культур сосны корейской (*Pinus koraiensis* Siebold et Zucc.) на территории Уссурийского филиала КГКУ «Приморское лесничество» // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. М., 2021. Том XI. С. 417–419.
7. Грибов С. Е., Ганжа Н. В. Лесоводственно-экономическая оценка лесных культур, созданных различным видом посадочного материала // Молочнохозяйственный вестник. 2015. № 1 (17). С. 14–22.
8. Проведение наблюдений за сохранностью и ростом лесных культур зеленого пояса города Астаны / А. Н. Кабанов [и др.] // Вестник науки Казахского агротехнического университета имени С. Сейфуллина. 2018. № 2 (97). С. 15–23.
9. Изучение сохранности и роста лесных культур на условнолесопригодных почвах в пригородных лесах г. Астаны / С. А. Кабанова [и др.] // Лесное хоз-во и зеленое строительство в Западной Сибири: материалы VIII Междунар. науч. интернет-конф., Томск, 13–15 янв. 2016 г. Томск, 2016. С. 53–55.

10. Юреня А. В., Якимов Н. И., Соколовский И. В. Приживаемость древесных и кустарниковых пород в санитарно-защитной зоне илового хозяйства УП «Минскводоканал» // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 1. С. 74–78.

11. Юреня А. В., Якимов Н. И. Биологическая рекультивация иловых полей унитарного предприятия «Минскводоканал» посадками деревьев разных древесных видов // Актуальные научно-технические и экологические проблемы мелиорации земель: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Горки, 11–12 мар. 2021 г. Горки, 2022. С. 237–242.

12. Дроздов И. И., Приставко А. А., Приставко И. А. Особенности роста лесных культур сосны в зоне широколиственных лесов на примере Брянской области // Вестник МГУЛ. Лесной вестник. 2014. № 4. С. 45–52.

References

1. Rodin A. R. *Lesnyye kul'tury* [Forest crops]. Moscow, MGUL Publ., 2002. 268 p. (In Russian).
2. Pisarenko A. I., Merzlenko M. D. *Sozdaniye iskusstvennykh lesov* [Creation of artificial forests]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1990. 270 p. (In Russian).
3. Romanov E. M., Eremin N. V., Nureeva T. V. Artificial reforestation: monitoring and efficiency improvement. *Lesnoye khozyaystvo* [Forestry], 2008, no. 1, pp. 31–33 (In Russian).
4. Dedenko T. P., Talashchuk L. G. Growth and condition of black locust and silver birch in various edaphic conditions of technogenically disturbed lands. *Bioraznoobraziye i ustoychivost' yestestvennykh i iskusstvennykh rastitel'nykh soobshchestv: materialy Vserossiyskoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Biodiversity and stability of natural and artificial plant communities: materials of the All-Russian Youth Scientific and Practical Conference]. Voronezh, 2022, pp. 22–26 (In Russian).
5. Rakhimzhanov A. N., Zalesov S. V., Zarubina L. V. Analysis of the preservation of forest crops in the fescue-feather grass steppe of Northern Kazakhstan. *Lesnaya Rossiya i khozyaystvo v nikh* [Forests of Russia and their management], 2019, no. 1 (68), pp. 11–18 (In Russian).
6. Rozlomiy N. G., Pluzhnik M. A. Dynamics of conservation of Korean pine (*Pinus koraiensis* Siebold et Zucc.) forest plantations on the territory of the Ussuri branch of the Primorskoye forestry. *Sovremennyye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza* [Modern problems of geology, geophysics and geocology of the North Caucasus]. Moscow, 2021, vol. XI, pp. 417–419 (In Russian).
7. Gribov S. E., Ganzha N. V. Silvicultural and economic assessment of forest cultures created by various types of planting material. *Molochnokhozyaystvennyy vestnik* [Dairy Bulletin], 2015, no. 1 (17), pp. 14–22 (In Russian).
8. Kabanov A. N., Kabanova S. A., Kochegarov I. S., Shakhmatov P. F. Monitoring the safety and growth of forest crops in the green belt of the city of Astana. *Vestnik nauki Kazakhskogo agrotekhnicheskogo universiteta imeni S. Seyfullina* [Bulletin of S. Seifullin Science of the Kazakh Agrotechnical University], 2018, no. 2 (97), pp. 15–23 (In Russian).
9. Kabanova S. A., Kabanov A. N., Rakhimzhanov A. N., Shakhmatov P. F., Bortsov V. A. Study of the preservation and growth of forest crops on conditionally forest-suitable soils in the suburban forests of Astana. *Lesnoye khozyaystvo i zelenoye stroitel'stvo v Zapadnoy Sibiri: materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchnoy internet-konferentsii* [Forestry and green construction in Western Siberia: materials of the VIII International Scientific Internet Conference]. Tomsk, 2016, pp. 53–55 (In Russian).
10. Yurenya A. V., Yakimov N. I., Sokolovsky I. V. Survival rate of trees and shrubs in the sanitary protection zone of the sludge management of UE “Minskvodokanal”. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forestry. Nature management. Processing of Renewable Resources, 2021, no. 1, pp. 74–78 (In Russian).
11. Yurenya A. V., Yakimov N. I. Biological reclamation of silt fields of the unitary enterprise “Minskvodokanal” by planting trees of different tree species. *Aktual'nyye nauchno-tekhnicheskiye i ekologicheskkiye problemy melioratsii zemel': materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual scientific, technical and environmental problems of land reclamation: proceedings of the International scientific-practical conference]. Gorki, 2022, pp. 237–242 (In Russian).
12. Drozdov I. I., Pristavko A. A., Pristavko I. A. Peculiarities of growth of pine forest crops in the zone of broad-leaved forests on the example of the Bryansk region. *Vestnik MGUL. Lesnoy vestnik* [Bulletin Moscow State Forest University. Forest Bulletin], 2014, no. 4, pp. 45–52 (In Russian).

Информация об авторах

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

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

Юрeня Елена Геннадьевна – старший преподаватель кафедры организации производства и экономики недвижимости. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: eurenya@belstu.by

Information about the authors

Yurenya Andrey Vladimirovich – PhD (Agriculture), Assistant Professor, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: urenya@belstu.by

Yakimov Nikolay Ignat'yevich – PhD (Agriculture), Assistant Professor, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yakimov@belstu.by

Yurenya Elena Gennad'evna – Senior Lecturer, the Department of Production Organization and Real Estate Economics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: eurenya@belstu.by

Поступила 14.10.2022

ЛЕСОЗАЩИТА И САДОВО-ПАРКОВОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

FOREST PROTECTION AND LANDSCAPING

УДК 577.212:632.4

О. Ю. Баранов^{1,2}, Л. О. Иващенко²

¹Национальная академия наук Республики Беларусь

²Белорусский государственный технологический университет

РАЗРАБОТКА НАБОРА ПРАЙМЕРОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ОФИОСТОМОВЫХ ГРИБОВ, АССОЦИИРОВАННЫХ С ПРОЦЕССАМИ УСЫХАНИЯ ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО

Полимеразная цепная реакция (ПЦР) – технология, основанная на ферментативной амплификации матрицы ДНК в условиях *in vitro*, которая используется для быстрого обнаружения, характеристики и идентификации различных биологических организмов. Одним из наиболее важных этапов при проведении ПЦР-анализа является разработка праймеров, позволяющих наиболее точно диагностировать изучаемый объект. В данной статье описана технология разработки олигонуклеотидных праймеров, специфичных для фитопатогенных грибов семейства *Ophiostomataceae* Nannf., ассоциированных с поражением сосудистой системы дуба черешчатого *Quercus robur* L. В основу подхода положено использование родоспецифичных участков ДНК для создания последовательностей олигонуклеотидов.

Ключевые слова: офиостомовые грибы, *Q. robur*, праймер, усыхание, ПЦР.

Для цитирования: Баранов О. Ю., Иващенко Л. О. Разработка набора праймеров для диагностики офиостомовых грибов, ассоциированных с процессами усыхания дуба черешчатого // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 41–48. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-05.

O. Yu. Baranov^{1,2}, L. O. Ivashchenko²

¹National Academy of Sciences of the Republic of Belarus

²Belarussian State Technological University

DEVELOPMENT OF A SET OF PRIMERS FOR THE DIAGNOSIS OF OPHIOSTOMA FUNGI ASSOCIATED WITH DRYING PROCESSES OF ENGLISH OAK

Polymerase chain reaction (PCR) is a technology based on enzymatic amplification of DNA template *in vitro*, which is used for rapid detection, characterization and identification of various biological organisms. One of the most important stages in the PCR analysis is the development of primers that allow the most accurate diagnosis of the object under study. This article describes the technology for the development of oligonucleotide primers specific for phytopathogenic fungi of the family *Ophiostomataceae* Nannf., associated with the lesion of the vascular system of English oak *Quercus robur* L. The approach is based on the use of genus-specific DNA regions to create oligonucleotide sequences.

Keywords: Ophiostoma fungi, *Quercus robur*, primer, desiccation, PCR.

For citation: Baranov O. Yu., Ivashchenko L. O. Development of a set of primers for the diagnosis of ophiostoma fungi associated with drying processes of English oak. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 41–48. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-05 (In Russian).

Введение. Массовое усыхание дубовых насаждений в Европе наблюдается с начала XX в. [1]. С 1990-х гг. усыхание дуба считается

многофакторным процессом, в котором значительную роль играют абиотические факторы – уменьшение количества атмосферных осадков

в вегетационный период, снижение уровня грунтовых вод, повышенные температуры воздуха и т. д. Тем не менее, немаловажными выступают и биотические факторы, такие как распространение стволовых вредителей и фитопатогенных организмов, вызывающих повреждение сосудистой системы деревьев дуба. Кроме прямого воздействия на деревья, стволовые вредители способствуют более быстрому распространению инфекций, перенося возбудителей заболеваний на поверхности или внутри тела насекомого [2].

По данным лесопатологических обследований Учреждения «Беллесозащита» [3], на начало 2022 г. общая площадь очагов инфекционных болезней дуба составила порядка 3,4 тыс. га, или 1,4% от суммарной площади дубрав Беларуси. Одним из основных типов заболеваний является поражение сосудистой системы деревьев офистомовыми грибами (семейство *Ophiostomataceae*) [4].

Офистомовые грибы представляют собой широко распространенную группу фитопатогенных грибов лесных древесных растений не только в Беларуси, но и в других странах. Внешний характер вызываемых повреждений связан с изменением окраски заболонной части древесины, что обуславливает ее низкую экономическую ценность. Массовое возникновение очагов и распространение некоторых видов офистомовых грибов оказало значительное влияние на естественные леса и нанесло существенный ущерб мировому лесному хозяйству в течение прошлого века [5, 6].

Большинство представителей семейства *Ophiostomataceae* могут заражать деревья через раны и трещины, образующиеся в результате жизнедеятельности стволовых вредителей, а также механических повреждений, вызванных ветром, низкими отрицательными температурами и др. [7]. Наиболее благоприятными условиями для проникновения и развития инфекции в стволе дерева является глубокое нарушение покровных тканей и относительно недавний характер повреждения [8].

Следует отметить, что многие представители офистомовых грибов часто ассоциированы с короедами подсемейства *Scolytinae* Latreille, которые колонизируют ослабленные или недавно погибшие деревья [9]. Примером такой взаимосвязи может служить голландская болезнь вязов, вызываемая грибом *Ophiostoma ulmi*, распространяемого ильмовыми заболонниками из рода *Scolytus* Geoffr. Распространение инфекции в прошлом веке привело к эпифитотиям и гибели значительного числа насаждений вяза в Европе и Северной Америке [10].

Диагностика поражения сосудистой системы дуба зачастую проводится по внешним

признакам поражения деревьев (морфологический метод), т. е. на поздних стадиях развития болезни. Кроме того, данный метод не позволяет точно определить возбудителя, поскольку сходные симптомы заболеваний могут быть вызваны как различными видами патогенных организмов, так и неблагоприятными внешними условиями.

Таким образом, разработка метода ранней диагностики офистомовых грибов является одной из актуальных задач, связанных с совершенствованием системы лесопатологического мониторинга дубрав. В настоящее время наряду с используемыми классическими методами диагностики фитопатогенных грибов наибольшую значимость приобретают молекулярно-генетические подходы, основанные на выявлении ДНК возбудителя [11].

Основная часть. Диагностика возбудителей болезней лесных древесных растений имеет основополагающее значение практически для всех аспектов, связанных с патогенезом растений. Точная идентификация и раннее обнаружение фитопатогенных организмов является первоосновой для своевременной организации и проведения защитных мероприятий, направленных на элиминацию вредных организмов. Исходя из трудоемкости и высокой субъективности результатов идентификации патогенов, основанной только на анализе морфологических характеристик, использование методов ДНК-маркирования (и в частности, ПЦР-основанных подходов) является наиболее эффективным и информативным инструментом для быстрой и точной диагностики болезней растений [12].

Классический вариант ПЦР-амплификации включает в себя повторяющиеся циклы денатурации матрицы, отжига праймеров и удлинения маркерного региона клонируемой последовательности ДНК, фланкированного двумя олигонуклеотидными праймерами. При этом разработка олигонуклеотидов, специфичных для целевых организмов, является одним из наиболее важных элементов метода молекулярно-генетической диагностики. Праймеры, которые являются уникальными для амплифицируемой последовательности-мишени, должны удовлетворять определенным термодинамическим критериям, связанным с их размером, температурой отжига и плавления, способностью формировать вторичную структуру, специфично и др. [13].

Дизайн праймеров с использованием последовательностей внутренних транскрибируемых спейсеров ITS1 и ITS2 областей рДНК получил широкое распространение в молекулярно-генетической идентификации фитопатогенных грибов,

так как их изменчивость с диагностической точки зрения является информативной и достаточной для определения таксономической принадлежности патогенов [14]. На сегодняшний день олигонуклеотиды, разработанные на основе последовательностей внутренних транскрибируемых спейсеров, используются для обнаружения более 80 видов фитопатогенных грибов. Гены рРНК (18S, 5,8S и 28S) грибов характеризуются более низким (по сравнению с ITS1 и ITS2) уровнем филогенетических преобразований и поэтому в наибольшей степени пригодны для изучения таксономических групп на уровне родов или выше [12].

С целью создания видоспецифичных праймеров последовательности целевой рДНК грибов могут быть получены из специализированных баз данных (например, NCBI GenBank [https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi]) или путем секвенирования целевого фрагмента рДНК изучаемых образцов генетического материала грибов с помощью универсальных праймеров [15]. Последующее сравнение последовательностей рДНК-мишени среди родственных видов грибов

позволяет идентифицировать консервативные таксоноспецифические регионы и разработать структуру диагностических праймеров [12].

Целью данной работы является разработка родоспецифичных олигонуклеотидных последовательностей для идентификации фитопатогенных грибов семейства *Ophiostomataceae*, ассоциированных с процессами усыхания дубовых насаждений Беларуси.

На первом этапе исследований с использованием литературных данных был актуализирован видовой состав микромицетов, вызывающих поражение проводящих тканей растений *Q. robur*. Полученные данные относительно патогенных грибов семейства *Ophiostomataceae* представлены в табл. 1.

Большинство из этих видов на территории Беларуси не зафиксированы (по данным из Глобальной информационной системы о биоразнообразии GBIF [https://www.gbif.org/]), что может быть связано с их отсутствием в настоящее время или невозможностью проведения достоверной лабораторной идентификации.

Таблица 1

Перечень представителей семейства *Ophiostomataceae*, ассоциированных с дубом черешчатым

№ п/п	Род	Вид	Литературный источник
1	<i>Sporothrix</i> Hektoen & C.F.Perkins	<i>S. abietina</i>	Selochnik N. N. et al. [16]
2		<i>S. dentifunda</i>	Aghayeva D. N. et al. [17]
3		<i>S. eucastaneae</i>	Jankowiak R. et al. [9]
4		<i>S. fusiformis</i>	Selochnik N. N. et al. [16]
5		<i>S. inflata</i>	Halmschlager E. [18]
6		<i>S. lunata</i>	Selochnik N. N. et al. [16]
7		<i>S. prolifera</i>	Jankowiak R. et al. [9]
8		<i>S. stenoceras</i>	
9		<i>S. schenckii</i>	Selochnik N. N. et al. [16]
10	<i>Ophiostoma</i> Syd. & P.Syd.	<i>O. australiae</i>	Taerum S. J. et al. [19]
11		<i>O. boreale</i>	
12		<i>O. denticiliatum</i>	
13		<i>O. himal-ulmi</i>	
14		<i>O. karelicum</i>	
15		<i>O. novo-ulmi</i>	Jankowiak R. et al. [9]
16		<i>O. solheimii</i>	
17		<i>O. sparsiannulatum</i>	Jankowiak R. et al. [9]
18		<i>O. tasmaniense</i>	Taerum S. J. et al. [19]
19		<i>O. tsotsi</i>	
20		<i>O. ulmi</i>	
21	<i>O. undulatum</i>		
22	<i>O. villosum</i>	Aas T. et al. [20]	
23	<i>Leptographium</i> Lagerb. & Melin	<i>L. flavum</i>	Jankowiak R. et al. [9]
24		<i>L. procerum</i>	Aas T. et al. [20]
25		<i>L. tardum</i>	Jankowiak R. et al. [9]
26		<i>L. verrucosum</i>	Gebhardt H. et al. [21]
27		<i>L. vulnerum</i>	Jankowiak R. et al. [9]

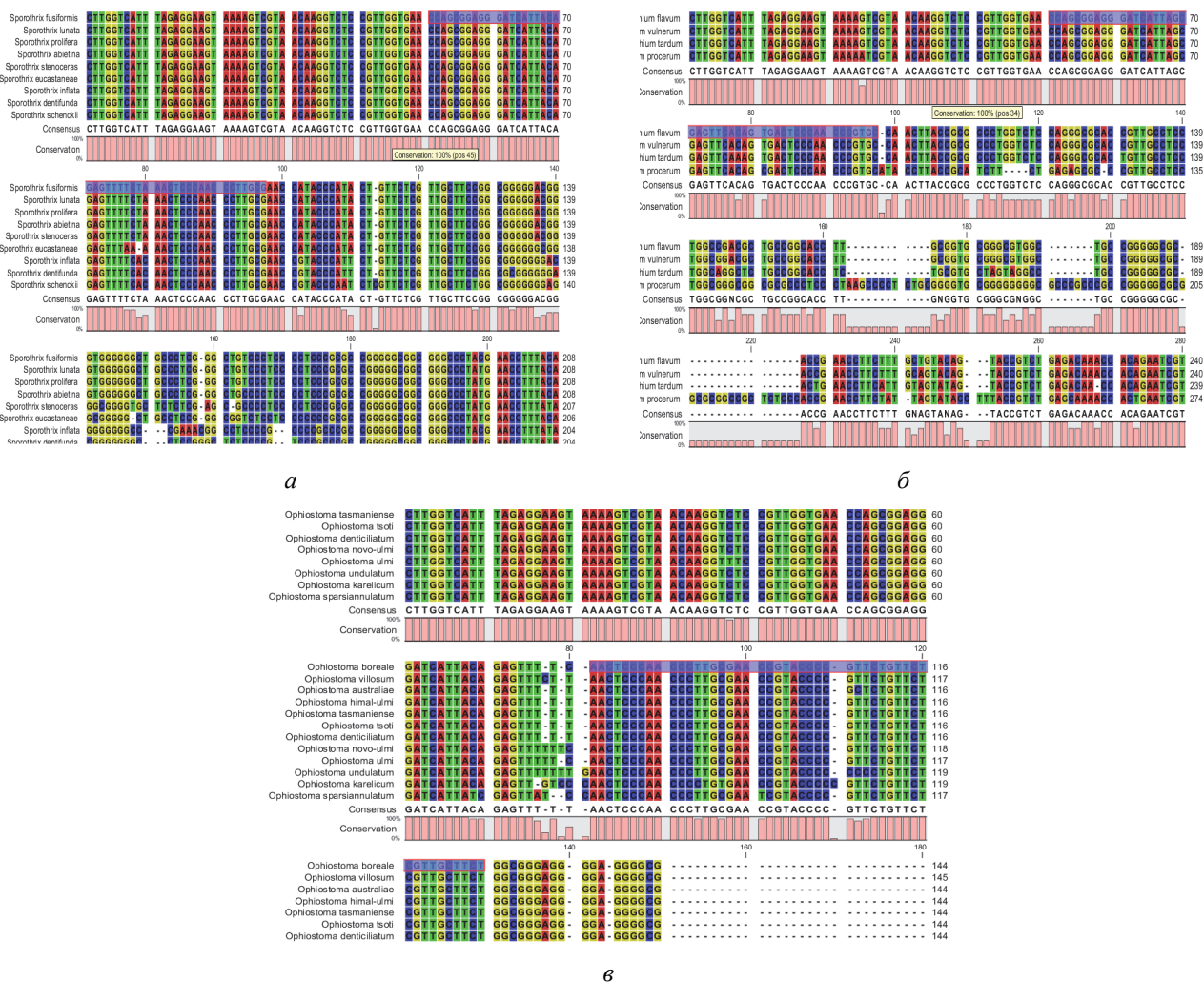


Рис. 1. Фрагменты выравнивания видов семейства *Ophiostomatacea* с выделенными консервативными участками: а – род *Sporothrix*; б – род *Leptographium*; в – род *Ophiostoma*

На следующем этапе работы была сформирована база данных нуклеотидных последовательностей, состоящая из 27 видов офистомовых грибов.

Формирование нуклеотидных последовательностей производилось на основе имеющихся в международном геном банке NCBI GenBank данных. При помощи программного обеспечения CLC Sequence Viewer 6.6.2 было проведено выравнивание последовательностей для определения консервативных участков с целью последующего подбора регионов для разработки структуры праймеров. Фрагменты выравнивания видов представлены на рис. 1.

На основе анализа консервативных участков ДНК с использованием специального программного обеспечения Primer Blast для каждого из изучаемых родов были разработаны 30 вариантов пар праймеров согласно следующим критериям: размер праймера – в диапазоне от 18 до 30 оснований; GC-состав – не менее 50%; различия в температурах плавления

(T_m) между прямым и обратным праймером не более чем 2–3 °С, отсутствие вторичной структуры (шпильки или димеры) [21–23], температура плавления (T_m) – 55–63 °С; длина ампликона – от 390 до 515 п. н. Все остальные параметры принимались «по умолчанию».

Последующий детальный анализ термодинамических характеристик разработанных структур олигонуклеотидных последовательностей позволил идентифицировать варианты праймеров, характеризующиеся наиболее оптимальными значениями указанных ранее характеристик (табл. 2).

Функциональность разработанных праймеров была протестирована модулем Primer Blast в базе данных нуклеотидных последовательностей NCBI GenBank. Полученные результаты показали, что пары праймеров являются специфичными по отношению к гену 18S рДНК представителей родов *Ophiostoma*, *Leptographium*, *Sporothrix*. На рис. 2 представлены результаты для пары олигонуклеотидов GLep (F) и GLep (R).

Таблица 2

Нуклеотидные последовательности разработанных праймеров

Род	Праймер	Последовательность праймера (5'-3')
<i>Leptographium</i>	GLep (F)	CCCAACCCGTGCCAACTTA
	GLep (R)	AGATGCTTACTGCGCTCGG
<i>Sporothrix</i>	GSp (F)	CCCTTGCGAACCATACCCAT
	GSp (R)	GGAGAACTTGCGTTCGGTACT
<i>Ophiostoma</i>	GOph (F)	CTGTTCTCGTTGCTTCTGGC
	GOph (R)	GCGAGAGAGAACTTGCCT

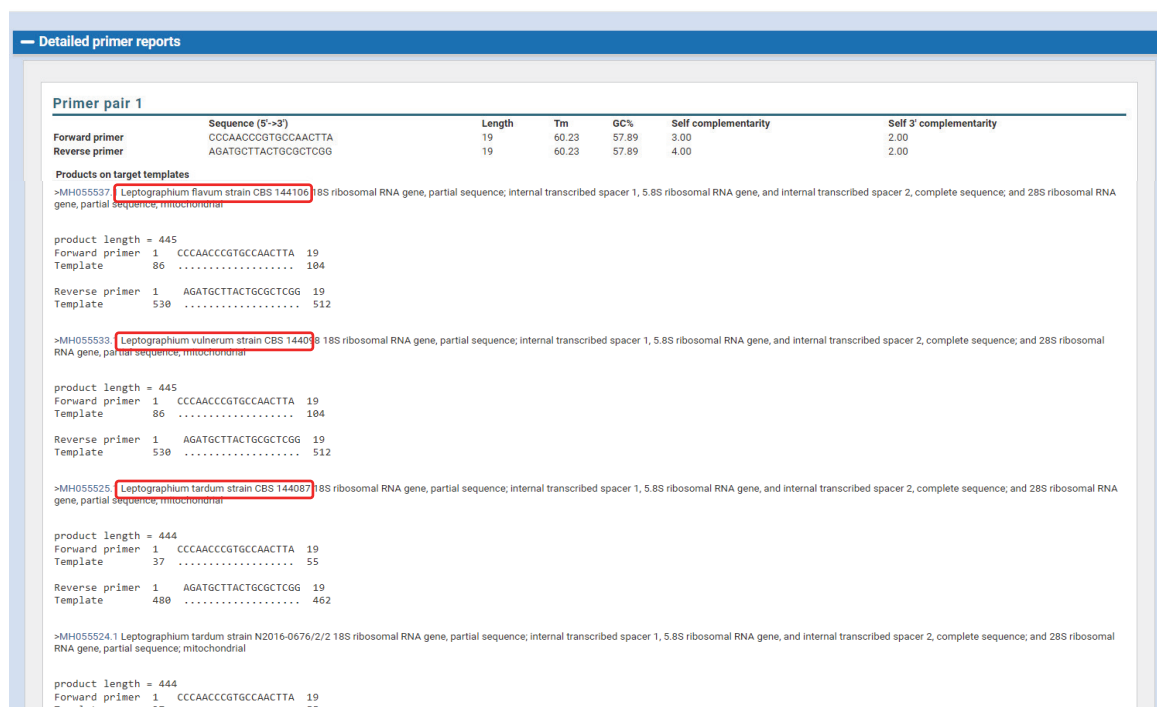


Рис. 2. Результаты тестирования в NCBI Primer Blast

Как видно из рис. 2, праймеры являются специфичными для представителей рода *Leptographium* и могут быть использованы для их идентификации в образцах пораженных тканей древесных растений. Аналогичные результаты были получены при тестировании праймеров для родов *Sporothrix* и *Ophiostoma*.

Заключение. Таким образом, в результате проведенных исследований сконструированы три пары специфичных праймеров, позволяющих идентифицировать и дифференцировать фитопатогенные грибы родов *Ophiostoma*,

Leptographium, *Sporothrix*. Специфичность разработанных праймеров подтверждена *in silico* с использованием доступных нуклеотидных последовательностей представителей данных родов в базе данных NCBI GenBank.

На следующем этапе исследований будут проведены тесты *in vitro* по изучению эффективности диагностики маркерных локусов офиостомовых грибов, как с использованием чистых культур изолятов патогенов, так и образцов дуба черешчатого, характеризующихся симптомами инфекционного поражения сосудистой системы.

Список литературы

1. Ragazzi A., Vagniluca S., Moricca S. European expansion of oak decline, involved microorganisms and methodological approaches // *Phytopathol. Mediterr.* 1995. Vol. 34. P. 207–226.
2. Oak Decline Caused by Biotic and Abiotic Factors in Central Europe: A Case Study from the Czech Republic / M. Machacova [et al.] // *Forests.* 2022. Vol. 13 (8). P. 1223.
3. Обзор лесопатологического и санитарного состояния лесного фонда Республики Беларусь за 2021 год и прогноз развития патологических процессов в 2022 году / М-во лесного хоз. Респ. Беларусь, Беллесозащита. Ждановичи, 2022. 84 с.

4. Федоров Н. И. Лесная фитопатология. Минск: БГТУ, 2004. 462 с.
5. Harrington T. C. Biology and taxonomy of fungi associated with bark beetles // Beetle-pathogen interactions in conifer forests. 1993. Vol. 25. P. 37–58.
6. The unified framework for biological invasions: a forest fungal pathogen perspective / M. J. Wingfield [et al.] // Biological Invasions. 2017. Vol. 19 (11). P. 3201–3214.
7. Gibbs J. N. The biology of ophiostomatoid fungi causing sapstain in trees and freshly cut logs // Ceratocystis and Ophiostoma. Taxonomy, ecology, and pathogenicity. 1993. Vol. 474. P. 153–160.
8. A diverse assemblage of Ophiostoma species, including two new taxa on eucalypt trees in South Africa / G. Kamgan Nkuekam [et al.] // Mycological progress. 2012. Vol. 11 (2). P. 515–533.
9. Four new Ophiostoma species associated with conifer-and hardwood-infesting bark and ambrosia beetles from the Czech Republic and Poland / R. Jankowiak [et al.] // Antonie van Leeuwenhoek. 2019. Vol. 112 (10). P. 1501–1521.
10. Three new species of Ophiostomatales from Nothofagus in Patagonia / A. de Errasti [et al.] // Mycological Progress. 2016. Vol. 15 (2). P. 1–15.
11. Early detection and identification of the main fungal pathogens for resistance evaluation of new genotypes of forest trees / K. A. Shestibratov [et al.] // Forests. 2018. Vol. 9 (12). P. 732–740.
12. Ma Z., Michailides T. J. Approaches for eliminating PCR inhibitors and designing PCR primers for the detection of phytopathogenic fungi // Crop Protection. 2007. Vol. 26 (2). P. 145–161.
13. Dieffenbach C. W., Lowe T. M., Dveksler G. S. General concepts for PCR primer design // PCR methods appl. 1993. Vol. 3 (3). P. 30–37.
14. Использование ПДАФ-маркеров для метагеномного анализа микробиомов насекомых-вредителей лиственных пород Беларуси / А. В. Падутов [и др.] // Современные проблемы лесозащиты и пути их решения: материалы II Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения проф. Николая Ильича Федорова и 90-летию каф. лесозащиты и древесиноведения, Минск, 30 нояб. – 4 дек. 2020 г.; под ред. В. Б. Звягинцева, М. О. Середич. Минск, 2020. С. 198–201.
15. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics / T. J. White [et al.] // PCR protocols: a guide to methods and applications. 1990. Vol. 18 (1). P. 315–322.
16. Ophiostomatoid fungi and their roles in *Quercus robur* dieback in Tellermann forest, Russia / N. N. Selochnik [et al.] // Silva Fenn. 2015. Vol. 49 (5). P. 16.
17. *Ophiostoma dentifundum* sp. nov. from oak in Europe, characterized using molecular phylogenetic data and morphology / D. N. Aghayeva [et al.] // Mycological Research. 2005. Vol. 109 (10). P. 1127–1136.
18. Halmschlager E., Kowalski T. *Sporothrix inflata*, a root-inhabiting fungus of *Quercus robur* and *Q. petraea* // Mycological Progress. 2003. Vol. 2 (4). P. 259–266.
19. *Ophiostoma quercus*: An unusually diverse and globally widespread tree-infecting fungus / S. J. Taerum [et al.] // Fungal biology. 2018. Vol. 122 (9). P. 900–910.
20. Four new *Ophiostoma* species associated with hardwood-infesting bark beetles in Norway and Poland / T. Aas [et al.] // Fungal biology. 2018. Vol. 122 (12). P. 1142–1158.
21. Gebhardt H., Kirschner R., Oberwinkler F. A new *Ophiostoma* species isolated from the ambrosia beetle *Xyleborus dryographus* (Coleoptera: Scolytidae) // Mycological Progress. 2002. Vol. 1 (4). P. 377–382.
22. Abd-Elsalam K. A. Bioinformatic tools and guideline for PCR primer design // African Journal of biotechnology. 2003. Vol. 2. (5). P. 91–95.
23. Achyar A., Atifah Y., Putri D. H. In silico study of developing a method for detecting pathogenic bacteria in refillable drinking water samples // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1940 (1). P. 012061.

References

1. Ragazzi A., Vagniluca S., Moricca S. European expansion of oak decline, involved microorganisms and methodological approaches. *Phytopathol. Mediterr*, 1995, vol. 34, pp. 207–226.
2. Machacova M., Nakladal O., Samek M., Bat'a D., Zumr V., Peskova V. Oak Decline Caused by Biotic and Abiotic Factors in Central Europe: A Case Study from the Czech Republic. *Forests*, 2022, vol. 13 (8), p. 1223.
3. *Obzor lesopatologicheskogo i sanitarnogo sostoyaniya lesnogo fonda Respubliki Belarus' za 2021 god i prognoz razvitiya patologicheskikh processov v 2022 godu* [Review of the forest pathological and

sanitary state of the forest fund of the Republic of Belarus for 2021 and the forecast for the development of pathological processes in 2022]. *Zhdanovich*, 2022. 84 p. (In Russian).

4. Fedorov N. I. *Lesnaya fitopatologiya* [Forest phytopathology]. Minsk, BSTU Publ., 2004. 462 p. (In Russian).

5. Harrington T. C. Biology and taxonomy of fungi associated with bark beetles. *Beetle-pathogen interactions in conifer forests*, 1993, vol. 25, pp. 37–58.

6. Wingfield M. J., Slippers B., Wingfield B. D., Barnes I. The unified framework for biological invasions: a forest fungal pathogen perspective. *Biological Invasions*, 2017, vol. 19 (11), pp. 3201–3214.

7. Gibbs J. N. The biology of ophiostomatoid fungi causing sapstain in trees and freshly cut logs. *Ceratocystis and Ophiostoma. Taxonomy, ecology, and pathogenicity*, 1993, vol. 474, pp. 153–160.

8. Kamgan Nkuekam G., Wilhelm de Beer Z., Wingfield M. J., Roux J. A diverse assemblage of *Ophiostoma* species, including two new taxa on eucalypt trees in South Africa. *Mycological progress*, 2012, vol. 11 (2), pp. 515–533.

9. Jankowiak R., Bilanski P., Strzalka B., Linnakoski R., Bosak A., Hausner G. Four new *Ophiostoma* species associated with conifer- and hardwood-infesting bark and ambrosia beetles from the Czech Republic and Poland. *Antonie van Leeuwenhoek*, 2019, vol. 112 (10), pp. 1501–1521.

10. de Errasti A., de Beer Z. W., Coetzee M. P. A., Roux J., Rajchenberg M., Wingfield M. J. Three new species of *Ophiostomatales* from *Nothofagus* in Patagonia. *Mycological Progress*, 2016, vol. 15 (2), pp. 1–15.

11. Shestibratov K. A., Baranov O. Yu., Subbotina N. M., Lebedev V. G., Panteleev S. V., Krutovsky K. V., Padutov V. E. Early detection and identification of the main fungal pathogens for resistance evaluation of new genotypes of forest trees. *Forests*, 2018, vol. 9 (12), pp. 732–740.

12. Ma Z., Michailides T. J. Approaches for eliminating PCR inhibitors and designing PCR primers for the detection of phytopathogenic fungi. *Crop Protection*, 2007, vol. 26 (2), pp. 145–161.

13. Dieffenbach C. W., Lowe T. M., Dveksler G. S. General concepts for PCR primer design. *PCR methods appl.*, 1993, vol. 3 (3), pp. 30–37.

14. Padutov A. V., Seredich M. O., Yarmolovich V. A., Pashkevich I. A., Baranov O. Yu. The use of PDAF markers for metagenomic analysis of microbiomes of insect pests of hardwoods in Belarus. *Sovremennyye problemy lesozashchity i puti ikh resheniya: materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchyonnoy 95-letiyu so dnya rozhdeniya professora Nikolaya Il'icha Fedorova i 90-letiyu kafedry lesozashchity i drevesinovedeniya* [Modern problems of forest protection and ways to solve them: materials of the II International Scientific and practical Conference, dedicated 95th birthday of professor Nikolai Ilyich Fedorov and the 90th anniversary of the Department of Forest Protection and Wood Science]. Minsk, 2020, pp. 198–201 (In Russian).

15. White T. J., Bruns T., Lee S., Taylor J. W. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. *PCR protocols: a guide to methods and applications*, 1990, vol. 18 (1), pp. 315–322.

16. Selochnik N. N., Pashenova N. V., Sidorov E., Wingfield M. J., Linnakoski R. Ophiostomatoid fungi and their roles in *Quercus robur* dieback in Tellermann forest, Russia. *Silva Fenn.*, 2015, vol. 49 (5), p. 16.

17. Aghayeva D. N., Wingfield M. J., Kirisits T., Wingfield B. D. *Ophiostoma dentifundum* sp. nov. from oak in Europe, characterized using molecular phylogenetic data and morphology. *Mycological Research*, 2005, vol. 109 (10), pp. 1127–1136.

18. Halmschlager E., Kowalski T. *Sporothrix inflata*, a root-inhabiting fungus of *Quercus robur* and *Q. petraea*. *Mycological Progress*, 2003, vol. 2 (4), pp. 259–266.

19. Taerum S. J., de Beer Z. W., Marincowitz S., Jankowiak R., Wingfield M. J. *Ophiostoma quercus*: An unusually diverse and globally widespread tree-infecting fungus. *Fungal biology*, 2018, vol. 122 (9), pp. 900–910.

20. Aas T., Solheim H., Jankowiak R., Bilanski P., Hausner G. Four new *Ophiostoma* species associated with hardwood-infesting bark beetles in Norway and Poland. *Fungal biology*, 2018, vol. 122 (12), pp. 1142–1158.

21. Gebhardt H., Kirschner R., Oberwinkler F. A new *Ophiostoma* species isolated from the ambrosia beetle *Xyleborus dryographus* (Coleoptera: Scolytidae). *Mycological Progress*, 2002, vol. 1 (4), pp. 377–382.

22. Abd-Elsalam K. A. Bioinformatic tools and guideline for PCR primer design. *African Journal of biotechnology*, 2003, vol. 2 (5), pp. 91–95.

23. Achyar A., Atifah Y., Putri D. H. *In silico* study of developing a method for detecting pathogenic bacteria in refillable drinking water samples. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1940 (1), p. 012061.

Информация об авторах

Баранов Олег Юрьевич – доктор биологических наук, доцент, академик-секретарь Отделения биологических наук. Национальная академия наук Беларуси (220072, г. Минск, пр-т Независимости, 66, Республика Беларусь); профессор кафедры лесозащиты и древесиноведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: betula-belarus@mail.ru

Ивашченко Любовь Олеговна – младший научный сотрудник кафедры лесозащиты и древесиноведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lyba281997@mail.ru

Information about the authors

Baranov Oleg Yurievich – DSc (Biological), Associate Professor, Academician-Secretary of the Department of Biological Sciences. National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus); Professor, Department of Forest Protection and Wood Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: betula-belarus@mail.ru

Ivashchenko Lyubov Olegovna – Junior Researcher, Department of Forest Protection and Wood Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lyba281997@mail.ru

Поступила 22.10.2022

УДК 551.583;581.5

М. В. Ермохин¹, А. А. Сазонов², Я. К. Игнатьев¹¹Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича НАН Беларуси²РУП «Белгослес»**БИОЛОГИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЛЕСОВ РАЗЛИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ**

С использованием материалов детального лесопатологического обследования трех лесхозов в 2017–2021 гг. (Глубокский, Барановичский, Мозырский), площади сплошных санитарных рубок в 2017–2021 гг. (Барановичский лесхоз) и исторических карт 1930-х годов выявлены особенности биологической устойчивости лесов различного происхождения и состава. Основными характеристиками, оказывающими влияние на нарушение биологической устойчивости лесов, являются (в порядке снижения значимости): категория земель, на которых появилось насаждение (лесные или сельскохозяйственные); происхождение (естественное или искусственное); состав древостоев (чистые или смешанные); лесная формация. Относительная площадь насаждений искусственного происхождения с нарушенной биологической устойчивостью в 3–4 раза выше на сельскохозяйственных землях по сравнению с насаждениями на лесных землях. Самой высокой биологической устойчивостью отличаются насаждения естественного происхождения и лесных культур, произрастающие на лесных землях. Относительная площадь чистых лесных культур, погибших в результате неблагоприятных погодных условий, на сельскохозяйственных землях в 25 раз выше, чем насаждений естественного и искусственного происхождения на лесных землях. Результаты исследования четко показывают, что для повышения устойчивости лесов необходимо изменение практики лесоразведения и лесовосстановления.

Ключевые слова: класс биологической устойчивости, гибель лесов, происхождение, категория земель, состав.

Для цитирования: Ермохин М. В., Сазонов А. А., Игнатьев Я. К. Биологическая устойчивость лесов различного происхождения // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 49–60. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-06.

M. V. Yermokhin¹, A. A. Sazonov², Ya. K. Ignatiev¹¹ V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Science of Belarus² Forest Inventory Republican Unitary Enterprise “Belgosles”**BIOLOGICAL STABILITY OF FORESTS OF DIFFERENT ORIGIN**

The features of biological stability of forests of various origin and composition are identified on the base of materials from a detailed forest pathological survey of three forestries in 2017–2021. (Gluboksky, Baranovichsky, Mozyrsky), areas of clear sanitary cuttings in 2017–2021 (Baranovich forestry) and historical maps of the 1930s. The main characteristics impact on the violation of the biological stability are (in descending order of importance): the previous category of land on which the stand appeared (forest land or agricultural land); origin (natural or artificial); composition of forest stands (pure or mixed); main species. It has been identified that the relative area of artificial stand with disturbed biological stability is 3–4 times higher on former agricultural lands compared to stand on forest lands. Natural and artificial stands growing on former forest lands have the highest biological stability. The relative area of pure artificial forest that died because of unfavorable weather conditions on former agricultural lands is 25 times higher than that of natural and artificial forest on former forest lands. The results of the study clearly show that to increase the biological stability of forests, it is necessary to change the practice of afforestation and reforestation.

Keywords: class of biological stability, death of forest stands, origin of stands, land category, composition.

For citation: Yermokhin M. V., Sazonov A. A., Ignatiev Ya. K. Biological stability of forests of different origin. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 49–60. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-06 (In Russian).

Введение. В последние десятилетия на территории Беларуси неоднократно происходила массовая гибель лесов (1996–1998, 2002–2004, 2009–2012, 2016–2019) [1]. Масштабы гибели

лесов в значительной степени определяются цикличностью погодно-климатических условий, прежде всего засушливых явлений, а также воздействием на леса ураганов и смерчей,

вслед за которыми активизируются вредители и болезни [2–4]. С глобальным изменением климата в последние десятилетия увеличивается интенсивность и продолжительность засух на территории Беларуси [5], что усиливает повреждение лесов.

При этом современная структура лесов на территории Беларуси в значительной степени связана не только и не столько с климатическими изменениями, сколько с хозяйственной деятельностью человека. Насаждения искусственного происхождения занимают 24% площади покрытых лесом земель [6], ежегодно создается около 40 тыс. га лесных культур [7]. Кроме того, состав и структура древостоев корректируются рубками ухода, санитарными и прочими видами рубок, которые ежегодно проводятся на площади около 450 тыс. га (5,4% площади покрытых лесом земель) [7]. Фактически без вмешательства человека остаются только территории заповедников, заповедные зоны национальных парков и труднодоступные заболоченные территории. Соответственно, в связи с большой площадью трансформированных лесов интенсивность и особенности распространения патологических процессов в лесах могут быть связаны и с хозяйственной деятельностью.

Наиболее показательный факт влияния лесохозяйственной деятельности на состояние лесов, о котором написано во всех отечественных учебниках по лесной фитопатологии, – это повреждение лесных культур сосны на бывших

сельскохозяйственных землях корневой губкой [8]. О более интенсивном повреждении лесных культур различными факторами (биотическими и абиотическими) говорят и материалы исследований последних десятилетий в период массовой гибели сначала еловых, а потом сосновых лесов [2–4, 9].

Тем не менее количественных оценок того, насколько менее устойчивыми являются лесные культуры, в том числе на бывших сельскохозяйственных землях Беларуси, до сих пор нет. Во многом это связано с большими затратами по масштабной оценке состояния насаждений, отсутствием сведений об истории создания и формирования древостоев и др. В то же время, практика создания лесных культур сосны на сельскохозяйственных землях до сих пор широко распространена. Поэтому в нашем исследовании мы постарались ответить на вопрос, влияет ли происхождение лесов (естественное или искусственное) и бывшая категория земель (сельскохозяйственные или лесные земли) на их биологическую устойчивость.

Объекты и методы исследования. Исследования проведены на территории трех лесохозяйственных учреждений, расположенных во всех геоботанических подзонах Беларуси [10]: Мозырского опытного (подзона широколиственно-сосновых лесов), Барановичского (подзона грабово-дубово-темнохвойных лесов), Глубокского опытного (подзона дубово-темнохвойных лесов) (рис. 1).

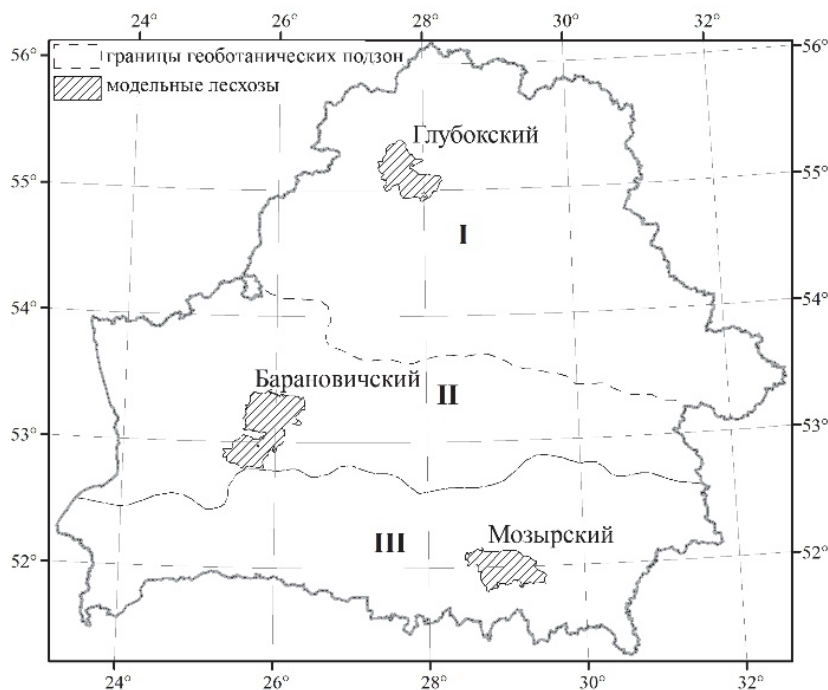


Рис. 1. Схема размещения объектов исследования (геоботанические подзоны: I – дубово-темнохвойных лесов; II – грабово-дубово-темнохвойных лесов; III – широколиственно-сосновых лесов)

Таблица 1

Краткая характеристика материалов лесопатологического обследования

Объект обследования (лесхоз) и год	Обследованная площадь, тыс. га	Площадь выделов в базе данных, га	Количество выделов, шт.
Мозырский, 2017	10,0	6675,3	2781
Мозырский, 2021	15,0	10 634,8	3803
Барановичский, 2019	17,5	13 535,4	4128
Барановичский, 2021	15,0	11 502,8	3635
Глубокский, 2020	15,0	9787,7	3817

Исходными данными для оценки послужили:

1) базы данных результатов лесопатологического обследования, проведенного на территории всех трех лесхозов в период 2017–2021 гг. Для двух лесхозов лесопатологическое обследование было проведено дважды, что позволило сравнить особенности повреждения лесов на пике массового усыхания и в период его затухания (табл. 1);

2) данные о сплошных санитарных рубках для Барановичского лесхоза за январь 2017 – ноябрь 2021 г. (табл. 2);

3) топографические карты, составленные Генштабом РККА (масштаб 1:50 000) и изданные в 1927–1936 гг.

Наиболее общим интегральным показателем, характеризующим состояние древостоев, является их жизнеспособность (или биологическая устойчивость). Для ее описания использовались три класса биологической устойчивости (КБУ), предложенные Е. Г. Мозолевской еще в начале 1980-х годов [11, 12], которые с некоторыми изменениями вошли в действующие «Санитарные правила...» [13]: 1 – биологически устойчивые; 2 – с нарушенной устойчивостью; 3 – утратившие устойчивость. Класс биологической устойчивости определялся для каждого лесопатологического выдела наряду с указанием характера повреждений.

Особенности ведения лесного хозяйства в Беларуси таковы, что в случае выявления насаждений 3-го класса биологической устойчивости

специалистами лесхозов в них оперативно проводятся сплошные санитарные рубки. Соответственно в базе лесопатологических обследований количество таких участков не отражает реальную площадь погибших насаждений. Для оценки площади погибших насаждений (3-й класс биологической устойчивости) использовалась площадь сплошных санитарных рубок, также в разрезе типов леса, классов возраста, происхождения, породного состава для одного модельного лесхоза (Барановичского).

Площадь вырубленных насаждений и насаждений с нарушенной биологической устойчивостью оценивалась как доля от общей площади насаждений соответствующего класса возраста, типа леса, происхождения и пр.

Каждый лесопатологический выдел и сплошная санитарная рубка вносились в геоинформационную базу данных, в которую были добавлены топографические карты, составленные Генштабом РККА 1927–1936 гг. Для каждого лесопатологического выдела и вырубki по топографической карте устанавливалась категория земель на 1920–30-е годы. Все участки были отнесены к двум категориям: лесные (далее категория «лес») и сельскохозяйственные (далее категория «с/х»). Для анализа не использовались участки, которые невозможно было отнести ни к одной из категорий. Это участки, попадающие на границу земель, на болота, расположенные в поймах рек, и некоторые другие. Общая площадь участков, использованных для анализа, приведена в табл. 2.

Таблица 2

Общая площадь и количество насаждений, использованных для анализа

Объект обследования (лесхоз) и год	Площадь выделов		Количество выделов	
	га	% от общего количества выделов в базе данных	шт.	% от общего количества выделов в базе данных
Из материалов лесопатологического обследования				
Мозырский, 2017	4391,8	65,8	1928	69,3
Мозырский, 2021	6614,2	62,2	2228	58,6
Барановичский, 2019	9821,1	72,6	3183	77,1
Барановичский, 2021	9404,2	81,8	2944	81,0
Глубокский, 2020	6470,6	66,1	2429	63,6
Из базы данных сплошных санитарных рубок				
Барановичский, 2017–2021	1984,4	97,9	2136	97,9

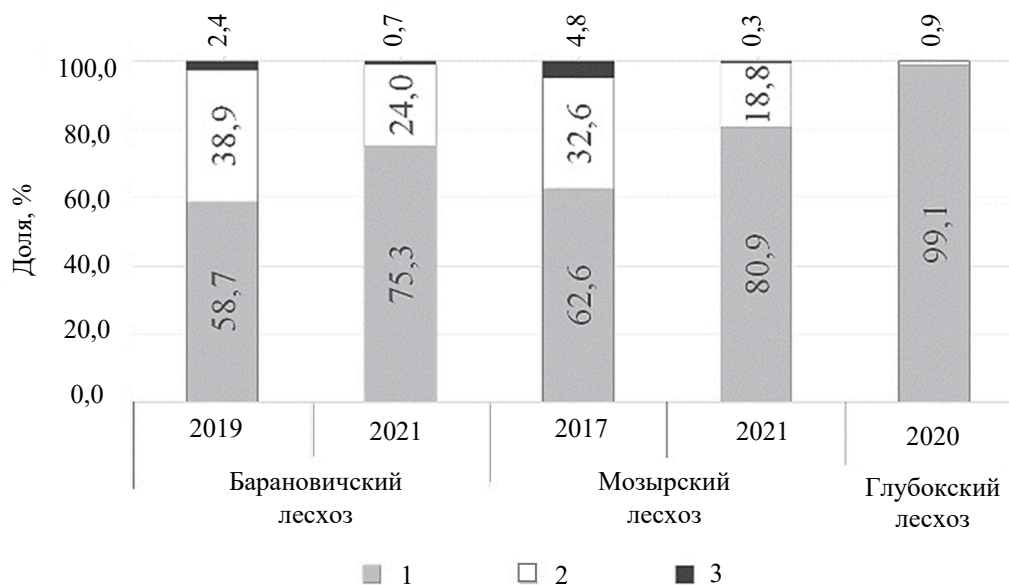


Рис. 2. Распределение насаждений по классам биологической устойчивости

Результаты исследования. Лесопатологические обследования были проведены в период массового усыхания сосновых древостоев, которое затронуло в первую очередь южные регионы Беларуси. В начале периода массового усыхания и на его пике относительная площадь насаждений с нарушенной устойчивостью составила 32,6% в Мозырском (2017 г.) и 38,9% в Барановичском лесхозе (2019 г.). По мере затухания вспышки массового размножения стволовых вредителей и после проведения санитарных рубок доля насаждений с нарушенной устойчивостью снизилась в 2021 г. до 18,8 и 24,0% соответственно (рис. 2). При этом насаждения в северных регионах Беларуси (Глубокский лесхоз) сохранили высокую биологическую устойчивость: доля насаждений с нарушенной устойчивостью составляет только 0,9%. Эти результаты подтверждают, что тотальное снижение устойчивости лесов во многом связано с продолжительными и интенсивными засухами в течение вегетационного сезона в южных регионах Беларуси.

Более четкую картину снижения устойчивости лесов дает их распределение по классам биологической устойчивости, происхождению и бывшей категории земель (рис. 3). Наиболее устойчивыми являются насаждения естественного происхождения на бывших лесных землях (ЕПЛ) и лесные культуры на бывших лесных землях (ЛКЛ). В начальный период массового усыхания (Мозырский лесхоз, 2017 г.) и на его пике (Барановичский лесхоз, 2019 г.) доля насаждений с нарушенной биологической устойчивостью в этих категориях составляла 12,8–19,6%.

При этом площадь насаждений с нарушенной биологической устойчивостью естественного происхождения на бывших сельскохозяйственных землях (ЕПСХ) была в полтора-два раза выше (30,0–30,1%). В конце периода массового усыхания (2021 г.) доля насаждений с нарушенной биологической устойчивостью выравнивалась между категориями за счет снижения относительной площади поврежденных насаждений ЕПСХ до 15,5–19,5%. Вероятнее всего, такое выравнивание связано с проведением в наиболее поврежденных насаждениях интенсивных санитарных рубок, не только выборочных, но и сплошных. Так, в Барановичском лесхозе за 2019–2021 гг. только сплошными санитарными рубками было вырублено более 1 тыс. га древостоев.

Наиболее поврежденными являются лесные культуры, созданные на бывших сельскохозяйственных землях (ЛКСХ). В начальный период усыхания в Мозырском лесхозе (2017 г.) доля насаждений с нарушенной биологической устойчивостью в этой категории составляла 54,5%. На пике усыхания в Барановичском лесхозе (2019 г.) – 70,1%. Это в 3–4 раза выше, чем доля насаждений с нарушенной биологической устойчивостью ЕПЛ. К 2021 г. их относительная площадь сократилась до 41,2–49,5%, что все равно в 3 раза выше, чем в ЕПЛ (рис. 3).

Эталонами биологически устойчивых насаждений могут являться насаждения Глубокского лесхоза, которые не были затронуты сильными и продолжительными засухами. Но и здесь доля насаждений с нарушенной биологической устойчивостью (2,9%) среди ЛКСХ почти в 3 раза выше, чем в ЕПЛ (1,0%).

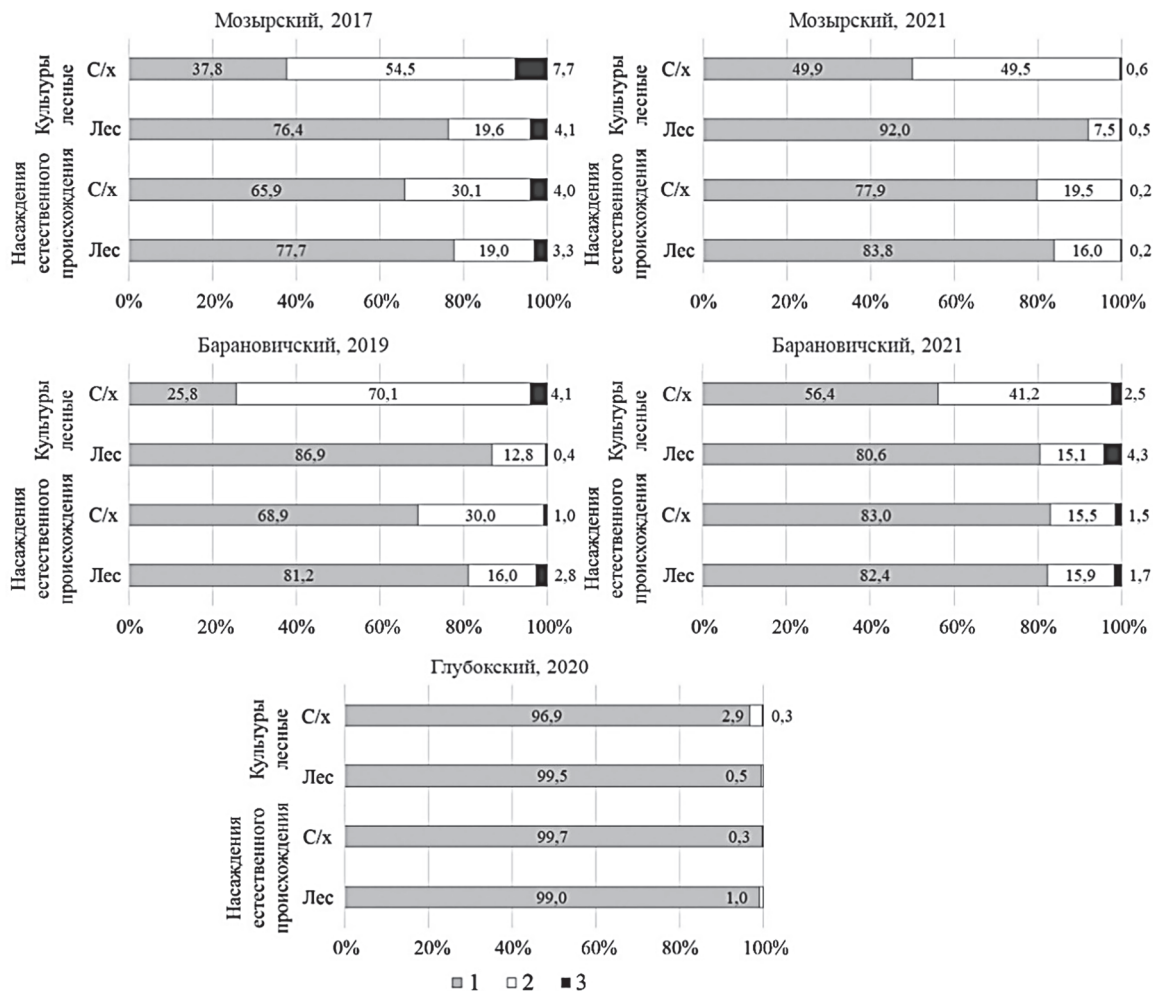


Рис. 3. Распределение насаждений по классам биологической устойчивости, происхождению и бывшим категориям земель (пояснения в тексте)

Если обобщить данные по всем модельным лесхозам за 2017–2021 гг., то видно, что биологическая устойчивость насаждений снижается в следующем ряду:

- 1) насаждения естественного и искусственного происхождения на бывших лесных землях;
- 2) насаждения естественного происхождения на бывших сельскохозяйственных землях (площадь насаждений с нарушенной биологической устойчивостью выше в 2 раза);
- 3) насаждения искусственного происхождения на бывших сельскохозяйственных землях (площадь насаждений с нарушенной биологической устойчивостью выше в 3–4 раза).

Выявленная зависимость сохраняется и для четырех основных лесообразующих пород: сосны, ели, березы и дуба (рис. 4). Для 2017 и 2019 гг. представлены результаты только для сосны, поскольку площади поврежденных насаждений ели, дуба и березы нерепрезентативны. Наиболее повреждаемыми являются насаждения дуба черешчатого на бывших сельскохозяйственных землях (до 80% площади).

На пике массового усыхания относительная площадь насаждений сосны с нарушенной биологической устойчивостью на сельскохозяйственных землях достигала 60,0%, на лесных – только 19,4%.

Относительная площадь еловых насаждений с нарушенной биологической устойчивостью высока как для бывших сельскохозяйственных, так и для лесных земель (24,5–29,6%).

Наибольшей устойчивостью во всех случаях отличаются насаждения березы повислой, так как относительная площадь насаждений с нарушенной биологической устойчивостью не превышает 5,4% на бывших сельскохозяйственных землях. На рис. 5 представлено изменение площади (%) древостоев сосны с нарушенной биологической устойчивостью в зависимости от доли главной породы в составе и бывшей категории земель в Мозырском лесхозе в 2017 и 2020 гг. Для остальных пород невозможно провести такой анализ по причине малой выборки в каждой из категорий состава.

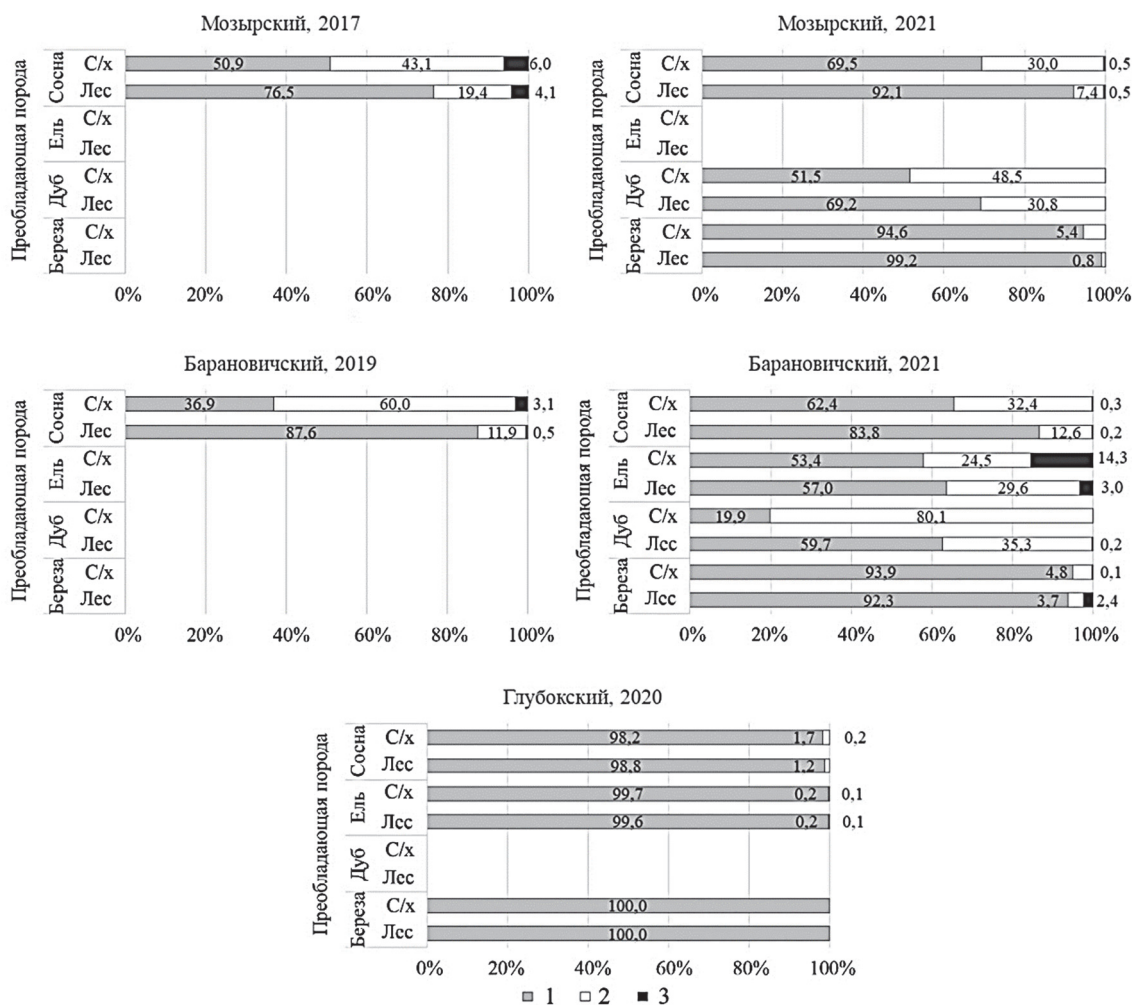


Рис. 4. Распределение насаждений по классам биологической устойчивости, главной древесной породе и бывшим категориям земель (пояснения в тексте)

Во всех четырех категориях насаждений сосны (ЕПЛ, ЛКЛ, ЕПСХ, ЛКСХ) относительная площадь насаждений с нарушенной биологической устойчивостью растет с увеличением доли сосны в древостое. В начале массового усыхания (2017 г.) при увеличении доли главной породы с 3–4 единиц в составе до 7–8 доля насаждений с нарушенной биологической устойчивостью возросла в среднем в 1,2 раза, до 9–10 единиц – в 1,7 раза. При этом следует отметить достаточно высокую относительную площадь даже в ЕПЛ (не менее 17,9%).

В заключительный период массового усыхания (2021 г.) быстрее всех восстанавливались смешанные ЕПЛ, ЕПСХ, а также ЛКЛ: доля насаждений с нарушенной устойчивостью составляет 1,7–4,8%. Увеличение доли сосны в древостое до 7–8 единиц в этих категориях насаждений в этот период приводит к увеличению доли поврежденных насаждений в среднем в 3,4 раза, до 9–10 единиц – в 6,7 раза. Но даже доля чистых насаждений с нарушенной биологической устойчивостью

в 2021 г. ниже, чем доля поврежденных смешанных насаждений в 2017 г.

Ситуация разительно отличается в ЛКСХ. Здесь даже в заключительный период массового усыхания сохранялась высокая относительная площадь насаждений с нарушенной биологической устойчивостью среди смешанных древостоев (38,5%), а в чистых достигала 61,5% (в начальный период массового усыхания их доля достигала 71,1%). Т. е. создание смешанных сосновых древостоев критически важно для сохранения биологической устойчивости в первую очередь именно для этой категории насаждений.

Нарушение биологической устойчивости насаждений еще не говорит об их последующей гибели, но создает все предпосылки для этого. Снятие негативного фактора, воздействующего на древостой, адаптация древостоев к нему или своевременное проведение санитарно-оздоровительных мероприятий позволяют насаждениям восстановить их устойчивость.



Рис. 5. Изменение площади насаждений с нарушенной устойчивостью (%) в зависимости от доли сосны в составе древостоя

Соответственно, площадь насаждений, утративших биологическую устойчивость и погибших, в несколько раз меньше, чем площадь насаждений с нарушенной биологической устойчивостью.

Для Барановичского лесхоза дополнительно были проанализированы данные о сплошных санитарных рубках за январь 2017 – ноябрь 2021 гг. Год гибели насаждения определялся по дате проведения санитарной рубки по следующей схеме: погибшими от неблагоприятных погодных условий в 2018 г. считались древостои, которые были вырублены в период с 01.05.2018 по 30.04.2019, и так для каждого года. Если причиной гибели насаждений указывался пожар или ветровал, то год гибели таких насаждений определялся по году проведения рубки.

Общая площадь проанализированных сплошных санитарных рубок по Барановичскому лесхозу составила 1984,4 га. Из них в 2017 г. погибли древостои на площади 658,1 га, в 2018 г. – на 367,9 га, в 2019 г. – на 528,8 га, в 2020 г. – 320,0 га и в 2021 г. – всего 69,1 га. Насаждения, вырубленные с января по апрель 2017 г., считались погибшими в 2016 г.

Динамика площади погибших насаждений показала очень интересную зависимость (рис. 6). Относительная площадь погибших ЕПЛ и ЛКЛ на протяжении 2017–2021 гг. колебалась от 0,1 до 0,7% при отсутствии трендов и

резкого изменения по годам. Сопоставив данные о гибели насаждений с материалами лесопатологического обследования, видно, что в насаждениях этих двух категорий происходит нарушение биологической устойчивости в отдельные неблагоприятные годы (2017, 2019), но доля погибших насаждений остается без изменения.

Иная ситуация развивалась в насаждениях на бывших сельскохозяйственных землях. Основной вклад в общую площадь погибших лесов вносили ЛКСХ. В 2017 г. относительная площадь погибших насаждений этой категории составила 8,8%, в 2019 г. – 5,2% (рис. 6). То есть в начальный период массового усыхания их относительная площадь была более чем в 20 раз выше площади погибших насаждений ЕПЛ. С затуханием вспышки массового размножения стволовых вредителей эта разница постепенно снижалась, и только к 2021 г. она сократилась до величин, сопоставимых с ЕПЛ.

Динамика площади погибших ЕПСХ повторила динамику погибших ЛКСХ. Однако их относительная площадь в 2–6 раз меньше в зависимости от года.

Такие значения и распределение погибших насаждений по категориям показывают, что первоначальным и основным источником снижения и утраты биологической устойчивости лесов являлись именно лесные культуры, созданные на бывших сельскохозяйственных землях.

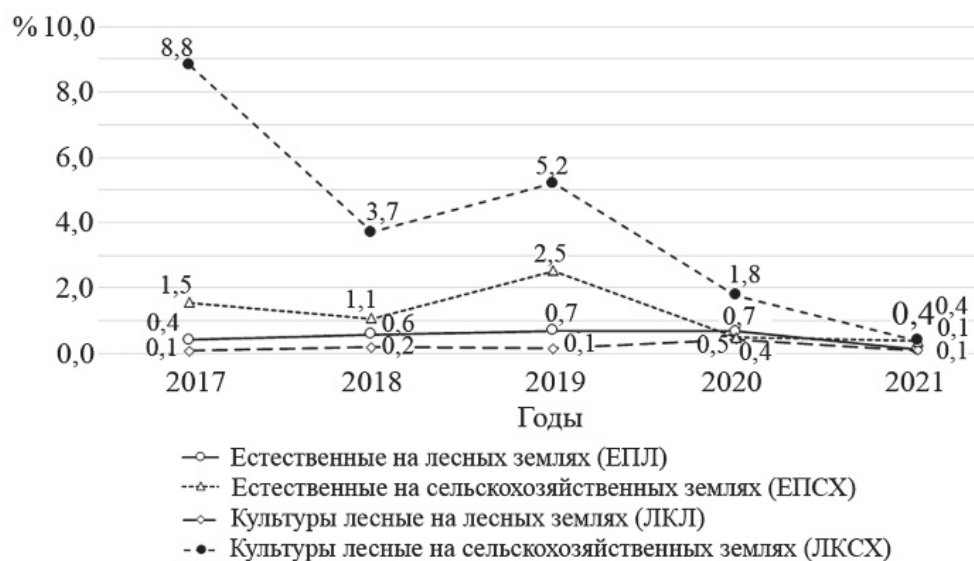


Рис. 6. Динамика площади (в процентах от площади соответствующей категории) древостоев, вырубленных сплошными санитарными рубками в зависимости от бывшей категории земель в Барановичском лесхозе (пояснения в тексте)

Утрата насаждениями биологической устойчивости и их гибель тесно связаны с составом насаждений и бывшей категорией земель. На рис. 7 представлено изменение площади (%) погибших древостоев сосны в зависимости от доли главной породы в составе и бывшей категории земель в Барановичском лесхозе в 2017–2021 гг.

Относительная площадь погибших насаждений сосны ЕПЛ и ЛКЛ колеблется в пределах 0,2–1,3% в зависимости от доли сосны в древостое и не имеет выраженного тренда. Т. е. состав

древостоя в этих категориях не влияет на гибель насаждений. Иная ситуация наблюдается в насаждениях сосны на бывших сельскохозяйственных землях. Как было показано, относительная площадь погибших насаждений на этих землях в целом выше, чем на лесных. При этом относительная площадь погибших ЕСХ в смешанных насаждениях (доля участия сосны в составе 3–6 единиц) составляет 0,4–1,8%. При увеличении доли сосны до 7–8 единиц площадь погибших насаждений этой категории возрастает вдвое, а до 9–10 единиц – в 2,5 раза.

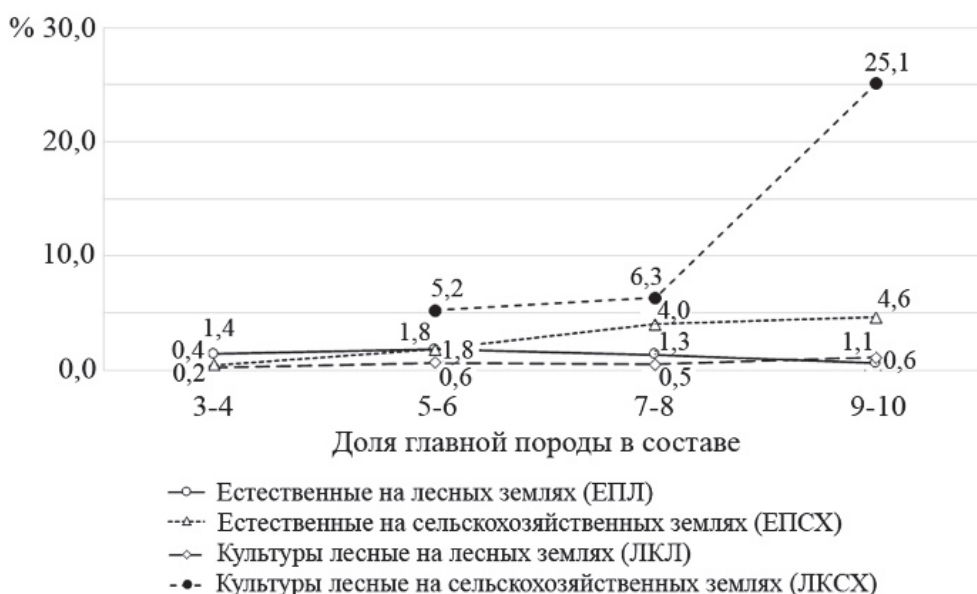


Рис. 7. Площадь (в процентах от площади соответствующей категории) погибших насаждений сосны в зависимости от доли главной породы в составе и бывшей категории земель в Барановичском лесхозе в 2017–2021 гг.

Относительная площадь погибших ЛКСХ выше в несколько раз, чем в других категориях насаждений независимо от состава. При доле участия сосны 5–6 единиц в составе древостоев относительная площадь погибших насаждений в этой категории составляет 5,2%, при 7–8 единицах – 6,3%. При увеличении доли сосны до 9–10 единиц относительная площадь погибших насаждений скачкообразно увеличивается и достигает 25,1%.

Заключение. Результаты проведенного исследования позволяют сделать несколько основных выводов.

1. Основными характеристиками, нарушающими биологическую устойчивость лесов, являются (в порядке снижения значимости): категория земель, на которых появилось насаждение (лесные или сельскохозяйственные); происхождение (естественное или искусственное); состав насаждений (чистые или смешанные); лесная формация.

2. Биологическая устойчивость насаждений снижается в следующем ряду: насаждения естественного и искусственного происхождения на бывших лесных землях; насаждения естественного происхождения на бывших сельскохозяйственных землях (относительная площадь насаждений с нарушенной биологической устойчивостью выше в 2 раза); насаждения искусственного происхождения на бывших сельскохозяйственных землях (относительная площадь насаждений с нарушенной биологической устойчивостью выше в 3–4 раза).

3. В разрезе лесных формаций наиболее высокая относительная площадь насаждений с нарушенной биологической устойчивостью среди дубрав, затем идут ельники, сосняки и березняки. Относительная площадь последних (до 5,4%) самая низкая среди всех формаций как на сельскохозяйственных, так и на лесных землях.

4. В сосняках относительная площадь насаждений с нарушенной биологической устойчивостью растет с увеличением доли сосны в древостое во всех категориях (естественные и искусственные насаждения на бывших сельскохозяйственных или лесных землях). Особенно сильно это проявляется в чистых лесных культурах на сельскохозяйственных землях, среди которых до 61,5–71,1% насаждений с нарушенной биологической устойчивостью (в зависимости от года). В то же время относительная площадь погибших насаждений сосны естественного и искусственного происхождения на бывших лесных землях колеблется в пределах 0,2–1,3% в зависимости от доли сосны в древостое и не имеет выраженного тренда.

5. Относительная площадь погибших лесных культур на сельскохозяйственных землях

выше, чем в других категориях насаждений при любом составе. При доле участия сосны 5–6 единиц в составе площади погибших древостоев равна 5,2%, при 7–8 единицах – 6,3%, а при достижении доли сосны 9–10 единиц увеличивается до 25,1%.

6. В начальный период массового усыхания относительная площадь погибших насаждений искусственного происхождения в 20 раз выше, чем площадь погибших насаждений естественного происхождения на лесных землях, и достигает 8,8%. Только через 4 года она снижается до величин, сопоставимых с естественными насаждениями на лесных землях. То есть именно эти насаждения являются триггером снижения биологической устойчивости лесов и массового усыхания.

7. Естественные и искусственные насаждения на бывших лесных землях отличаются высокой способностью адаптироваться к неблагоприятным погодным условиям по сравнению с насаждениями на бывших сельскохозяйственных землях. Об этом свидетельствует увеличение относительной площади насаждений с нарушенной биологической устойчивостью этих категорий в годы с неблагоприятными погодными условиями. При этом относительная площадь погибших насаждений этих категорий колеблется в пределах 0,1–0,7% в зависимости от года без выраженного тренда.

Результаты исследования в целом показывают низкую биологическую устойчивость насаждений на бывших сельскохозяйственных землях, что может быть связано только с особенностями почв. Некоторые исследования, проведенные в европейской части России, показывают существенные различия между выведенными из сельскохозяйственного оборота и лесными почвами. Лесные почвы на глубине 0–20 см имеют менее плотное сложение и большую водопроницаемость, особенно при сравнении с пастбищами. Водопроницаемость лесных почв в 3 раза выше, чем почв агроценозов. Кроме того, последние в 15 раз менее устойчивы к заливанию почв [14]. По разным исследованиям, только через 20–40 лет статистически подтверждается дифференциация старопахотной толщи на два горизонта по величинам плотности, схожим с лесными почвами [15, 16]. И только к 100 годам после прекращения окультуривания постепенно восстанавливаются соотношение и интенсивность элементарных почвообразовательных процессов [15], а почвы в лесах на старопахотных землях сохраняют следы пахотного горизонта до 180 лет [14]. Создание лесных культур в таких условиях изначально определяет их низкую биологическую устойчивость независимо от состава.

Фактически это означает, что на бывших сельскохозяйственных землях требуется использование особых технологий лесовосстановления и лесовыращивания, обеспечивающих устойчивость создаваемых древостоев. Применение здесь технологий, разработанных для лесных земель, оборачивается накоплением потенциально неустойчивых древостоев, которые в условиях потепления климата и обострения погодных стрессов начинают массово усыхать. Именно наличием большого количества древостоев сосны, произрастающих на бывших сельскохозяйственных угодьях, следует объяснять тот огромный ущерб, который нанесен сосновым лесам в результате вспышки массового размножения короедов в 2016–2021 гг. А это значит, что важнейшим предрасполагающим фактором массового усыхания сосновых лесов является существующая практика лесоразведения.

Выходом для повышения биологической устойчивости и сокращения в будущем площади погибших древостоев нам видится коренное изменение практики лесоразведения и лесовосстановления. Во-первых, следует ориентироваться на естественные сукцессии, протекающие на нарушенных землях, поскольку сама природа давно выработала оптимальный путь развития насаждений. При лесоразведении необходимо использовать естественное или искусственное (если невозможно достичь появления леса естественным путем в приемлемые сроки) лесовос-

становление пионерными лиственными породами: на минеральных почвах это береза повислая, осина, ольха серая (в северных регионах). Использование лиственных пород ускоряет почвообразовательные процессы, что сокращает период восстановления плодородия и возврата свойств нарушенных почв к лесным почвам. Только через 20–40 лет в древостоях пионерных пород можно будет увеличивать долю хвойных или широколиственных пород.

Во-вторых, при лесовосстановлении и лесоразведении (если сохранится практика создания лесных культур хвойных и широколиственных пород на старопахотных землях), а затем при рубках ухода необходимо поддерживать долю хвойных и широколиственных пород не больше 6 единиц. Это позволит снизить вероятность нарушения биологической устойчивости лесов в несколько раз, а для лесных культур сосны на старопахотных землях – более чем в 20 раз.

Работа выполнена в рамках задания 10.2.7 НИР «Динамика лесных экосистем в условиях инвазии чужеродных древесных растений и на стадиях формирования и распада древостоев» ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда», а также задания мероприятия 7 «Разработать интерактивную систему для оперативной оценки и прогнозирования последствий неблагоприятных климатических явлений в лесных экосистемах» ГП «Научно-инновационная деятельность Национальной академии наук Беларуси».

Список литературы

1. Природа Беларуси на рубеже тысячелетий / В. М. Байчоров [и др.]. Минск: Беларуская навука, 2020. 367 с.
2. Фёдоров Н. И., Сарнацкий В. В. Особенности формирования еловых лесов Беларуси в связи с их периодическим массовым усыханием. Минск: Тэхналогія, 2001. 180 с.
3. Пугачевский А. В., Барсукова Т. Л. Причинный анализ и лесотипологические особенности гибели древостоев в лесах Беларуси // Сб. науч. тр. Ин-та леса Нац. акад. наук Беларуси. Гомель, 2015. Вып. 75: Проблемы лесоведения и лесоводства. С. 586–596.
4. Сазонов А. А., Звягинцев В. Б. «Биологический пожар» соснового леса // Лесное и охотничье хозяйство. 2016. № 6. С. 9–13.
5. Логинов В. Ф., Лысенко С. А., Мельник В. И. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования. 2-е изд. Минск: Энциклопедикс, 2020. 264 с.
6. Государственный лесной кадастр Республики Беларусь на 01.01.2019. Минск: Белгослес, 2019. 63 с.
7. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь. Статистический сборник / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. Минск, 2021. 203 с.
8. Фёдоров Н. И. Лесная фитопатология. Минск: БГТУ, 2004. 462 с.
9. Массовое усыхание еловых лесов Беларуси на рубеже XX–XXI вв. и пути минимизации их последствий / А. А. Сазонов [и др.] // Лесное хозяйство. 2014. № 3. С. 9–12.
10. Гельтман В. С. Географический и типологический анализ лесной растительности Белоруссии. Минск: Наука и техника, 1982. 326 с.
11. Мозолевская Е. Г., Катаев О. А., Соколова Э. С. Методы лесопатологического обследования очагов стволовых вредителей и болезней леса. М.: Лесная промышленность, 1984. 152 с.
12. Воронцов А. И., Мозолевская Е. Г., Соколова Э. С. Технология защиты леса. М.: Экология, 1991. 304 с.
13. Санитарные правила в лесах Республики Беларусь: утв. постановлением М-ва лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 19 дек. 2016 г., № 79 (с изменениями: № 1 от 4 августа 2017 г.; № 2 от 5 марта 2019 г.). Минск: Минлесхоз, 2016. 31 с.

14. Хушназар Рахматуллозода Х. Р. Изменение свойств лесных почв под влиянием сельскохозяйственного пользования: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.03. М., 2000. 126 л.
15. Фомина А. С. Изменение свойств дерново-подзолистых песчаных почв при прекращении антропогенного воздействия: дис. ... канд. с.-х. наук: 03.00.27. СПб. – Пушкин, 2005. 180 л.
16. Чалая Т. А. Запасы углерода в почвах и растительности постагрогенных ландшафтов южной тайги: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.13. М., 2012. 148 л.

References

1. Baychorov V. M., Drobysch S. V., Dubovik D. V., Yermokhin M. V., Zharkina N. I., Zelenkevich N. A., Kadatskaya O. V., Kozulin A. V., Kudelskiy A. V., Kulikova Ye. Ya., Kukharchik T. I., Barsukova T. L., Lapa V. V., Loginov V. F., Martsinkevich G. I., Maslovskiy O. M., Matveev A. V., Makhnach A. A., Mikheeva T. M., Moroz M. D., Nikiforov M. Ye., Novitskiy R. V., Bogdevich I. M., Parfenov V. I., Plyuta M. V., Puhacheuski A. V., Puchilo A. V., Rudakovskiy I. A., Samusenko I. E., Sanets Ye. V., Semenchenko V. P., Skuratovich A. N., Sozinov O. V., Borodin O. I., Stepanovich I. M., Struk M. I., Sudnik A. V., Schastnaya I. I., Sysoy I. P., Tanovitskaya N. I., Usenya V. V., Ustin V. V., Khomich V. S., Tsvirko R. V., Buga S. V., Tsybulko N. N., Chaykovskiy A. I., Shabashova T. G., Shabeta M. S., Shakun V. V., Yurgenson N. A., Yatsukhno V. M., Yatsyna A. P., Vlasov B. P., Giginyak Yu. G., Grummo D. G., Drobenkov S. M., Nichiporovich S. A., Samuel S. P., Kovalenya A. A. *Priroda Belarusi na rubezhe tysyacheletiy* [The nature of Belarus at the turn of the millennium]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2020. 367 p. (In Russian).
2. Fedorov N. I., Sarnatskiy V. V. *Osobennosti formirovaniya yelovykh lesov Belarusi v svyazi s ikh periodicheskim massovym usykhaniyem* [Features of the formation of spruce forests in Belarus in connection with their periodic mass dying]. Minsk, Tekhnologiya Publ., 2001. 180 p. (In Russian).
3. Puhacheuski A. V., Barsukova T. L. Causal Analysis and Forest Typological Features of the Death of Tree Stands in the Forests of Belarus. *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 Silviculture and Forest Management, pp. 586–596 (In Russian).
4. Sazonov A. A., Zvyagintsev V. B. “Biological fire” of pine forests. *Lesnoye i okhotnich'ye khozyaystvo* [Forestry and hunting], 2016, no. 6, pp. 9–13 (In Russian).
5. 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).
6. *Gosudarstvennyy lesnoy kadastr Respubliki Belarus' na 01.01.2019* [State Forest Cadaster of the Republic of Belarus, 01.01.2019]. Minsk, Belgosles Publ., 2019. 63 p. (In Russian).
7. *Okhrana okruzhayushchey sredy v Respublike Belarus'. Statisticheskiy sbornik* [Environmental protection in the Republic of Belarus. Statistical compendium]. Minsk, 2021. 203 p. (In Russian).
8. Fedorov N. I. *Lesnaya fitopatologiya* [Forest phytopathology]. Minsk, BSTU Publ., 2004. 462 p. (In Russian).
9. Sazonov A. A., Kuhta V. N., Blintsov A. I., Zvyagintsev V. B., Yermokhin M. V. Mass drying up of spruce forests in Belarus at the turn of the 20th–21st centuries and ways to minimize their consequences. *Lesnoye khozyaystvo* [Forestry], 2014, no. 3, pp. 9–12 (In Russian).
10. Geltman V. S. *Geograficheskiy i tipologicheskiy analiz lesnoy rastitel'nosti Belorussii* [Geographical and typological analysis of forest vegetation in Belarus]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1982. 326 p. (In Russian).
11. Mozolevskaya E. G., Kataev O. A., Sokolova E. S. *Metody lesopatologicheskogo obsledovaniya ochagov stvolovykh vrediteley i bolezney lesa* [Methods of forest pathological examination of hotbeds of pests and diseases of the forest]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 152 p. (In Russian).
12. Vorontsov A. I., Mozolevskaya E. G., Sokolova E. S. *Tekhnologiya zashchity lesa* [Forest protection technology]. Moscow, Ekologiya Publ., 1991. 304 p. (In Russian).
13. *Sanitarnyye pravila v lesakh Respubliki Belarus': utverzhdeny postanovleniyem Ministerstva lesnogo khozyaystva Respubliki Belarus', 19 dekabrya 2016 goda, № 79 (s izmeneniyami: № 1 ot 4 avgusta 2017 goda; № 2 ot 5 marta 2019 goda)* [Sanitary forest regulations in the Republic of Belarus. Decree of the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus, December 19, 2016, no. 79 (with changes no. 1 from August 4, 2017, and no. 2 from March 5, 2019)]. Minsk, Minleskhoz Publ., 2016. 31 p. (In Russian).
14. Khushnazar Rakhmatullozoda Kh. R. *Izmeneniye svoystv lesnykh pochv pod vliyaniyem sel'skokhozyaystvennogo pol'zovaniya. Dissertatsiya kandidata sel'skokhozyaystvennykh nauk* [Changes in the properties of forest soils under the influence of agricultural use. Dissertation PhD (Agricltue)]. Moscow, 2000. 126 p. (In Russian).

15. Fomina A. S. *Izmeneniye svoystv dernovo-podzolistykh peschanykh pochv pri prekrashchenii antropogenogo vozdeystviya. Dissertatsiya kandidata sel'skokhozyaystvennykh nauk* [Changes in the properties of soddy-podzolic sandy soils upon the cease of anthropogenic impact. Dissertation PhD (Agricuture)]. St. Peterburg – Pushkin, 2005. 180 p. (In Russian).

16. Chalaya T. A. *Zapasy ugleroda v pochvakh i rastitel'nosti postagrogennykh landshaftov yuzhnoy taygi. Dissertatsiya kandidata biologicheskikh nauk* [Carbon stocks in soils and vegetation of postagrogenic landscapes of the southern taiga. Dissertation PhD (Biology)]. Moscow, 2012. 148 p. (In Russian).

Информация об авторах

Ермохин Максим Валерьевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии леса и дендрохронологии. Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 27, Республика Беларусь). E-mail: maxim.yermokhin@gmail.com

Сазонов Александр Александрович – начальник лесопатологической партии 1-й Минской лесостроительной экспедиции. РУП «Белгослес» (220089, г. Минск, ул. Железнодорожная, 27/1, Республика Беларусь). E-mail: lesopatolog@rambler.ru

Игнатьев Ярослав Константинович – младший научный сотрудник лаборатории экологии леса и дендрохронологии. Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 27, Республика Беларусь). E-mail: ignatev.y.k@gmail.com

Information about the authors

Yermokhin Maxim Valer'evich – PhD (Biology), Leading Researcher, Laboratory of Forest Ecology and Dendrochronology. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Science of Belarus (27, Academicheskaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: maxim.yermokhin@gmail.com

Sazonov Aleksandr Aleksandrovich – Head of Forest Pathology Department of First Minsk Forest Inventory Expedition. Forest Inventory Republican Unitary Enterprise “Belgosles” (27/1, Zheleznodorozhnaya str., 220089, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lesopatolog@rambler.ru

Ignatiev Yaroslav Konstantinovich – Junior Researcher, the Laboratory of Forest Ecology and Dendrochronology. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Science of Belarus (27, Academicheskaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ignatev.y.k@gmail.com

Поступила 16.09.2022

УДК 630*453:630*416.4

А. А. Сазонов¹, В. Н. Кухта², М. О. Романенко^{2,3}, С. В. Салук⁴¹РУП «Белгослес»²Белорусский государственный технологический университет³Латвийский государственный исследовательский институт «Силава»⁴Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам**СИНЯЯ СОСНОВАЯ ЗЛАТКА (*PHAENOPS CYANEA* (FABRICIUS, 1775)) –
НОВАЯ УГРОЗА ЛЕСАМ БЕЛАРУСИ**

На основании доступных источников, дополненных наблюдениями авторов, проводится литературный анализ проблемы повреждения сосновых лесов Европы стволовыми вредителями с участием *Phaenops cyanea* (Fabricius, 1775). Констатируется повышение хозяйственного значения этого вида начиная с 1990-х годов в ряде стран центральной Европы. Описываются его биология, экология, методы мониторинга популяций и защитные мероприятия. Определяются пробелы в знаниях, которые необходимо заполнить для получения целостной картины воздействия *Ph. cyanea* на сосновые древостои и построения эффективной системы защиты леса. Приводится информация об особенностях воздействия совместной вспышки массового размножения *Ips acuminatus* (Gyllenhal, 1827) и *Ph. cyanea* на сосновые леса Беларуси. Перечисляются доступные методы мониторинга и защитные мероприятия, которые могут применяться в очагах *Ph. cyanea*.

Ключевые слова: *Phaenops cyanea*, *Pinus sylvestris*, массовое усыхание, стволовые вредители, лесозащитные мероприятия, лесопатологический мониторинг.

Для цитирования: Сазонов А. А., Кухта В. Н., Романенко М. О., Салук С. В. Синяя сосновая златка (*Phaenops cyanea* (Fabricius, 1775)) – новая угроза лесам Беларуси // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 61–72. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-07.

А. А. Sazonov¹, V. N. Kukhta², M. A. Ramanenka^{2,3}, S. V. Saluk⁴¹Forest Inventory Republican Unitary Enterprise “Belgosles”²Belarusian State Technological University³Latvian State Forest Research Institute “Silava”⁴Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources**STEELBLUE JEWEL BEETLE (*PHAENOPS CYANEA* (FABRICIUS, 1775)) – A NEW
THREAT TO THE FORESTS OF BELARUS**

The article gives a literary analysis of the problem of damage to European pine forests by stem pests involving *Phaenops cyanea* (Fabricius, 1775) based on available sources supplemented by observations of the authors. An increase in the economic importance of this species since the 1990s in a number of Central European countries is stated. Its biology, ecology, methods of population monitoring and protective measures is described. The gaps in knowledge that need to be filled in order to obtain a holistic picture of the impact of *Ph. cyanea* on pine stands and build an effective forest protection system are identified. Information on the impact of a combined outbreak of mass reproduction of *Ips acuminatus* (Gyllenhal, 1827) and *Ph. cyanea* on pine forests of Belarus is provided. The available monitoring methods and protective measures that can be used in foci of *Ph. cyanea* at the current level of knowledge are listed.

Key words: *Phaenops cyanea*, *Pinus sylvestris*, mass desiccation, stem pests, forest protection measures, forest pathology monitoring.

For citation: Sazonov A. A., Kukhta V. N., Ramanenka M. A., Saluk S. V. Steelblue Jewel Beetle (*Phaenops cyanea* (Fabricius, 1775)) – a new threat to the forests of Belarus. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 61–72. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-07 (In Russian).

Введение. XXI в. породил множество новых угроз для лесного хозяйства, с которыми лесоводам прошлого никогда не приходилось сталкиваться. К их числу относятся как инвазии

многочисленных чужеродных видов вредителей и болезней, проникающих или уже проникших в европейские леса [1], так и трудно предсказуемые последствия климатических

изменений, негативное воздействие которых к середине нынешнего века будет только нарастать [2, 3]. Одной из таких угроз оказалось повышение вредности отдельных местных видов вредителей и возбудителей болезней растений, которые раньше не давали всплеск массового размножения на территории Беларуси и не считались опасными. Ярким примером последних лет служит массовое размножение вершинного короеда – *Ips acuminatus* Gyllenhal, 1827 (Coleoptera, Scolytinae) в сосновых лесах республики в 2016–2021 гг., которое привело к повреждению деревьев в различной степени на площади 826,1 тыс. га и потребовало проведения санитарно-оздоровительных мероприятий с вырубкой 38,1 млн м³ поврежденной древесины. Несмотря на беспрецедентные масштабы, усыхание сосновых лесов до сих пор остается слабо изученной проблемой в Беларуси, а представление о доминирующей роли вершинного короеда в комплексе ксилофагов сосны – сильно упрощенной моделью реальных процессов. Результаты исследований в ряде европейских стран показывают, что разрушительное воздействие на сосновые древостои оказывает комплекс ксилофагов, в котором значительное влияние может принадлежать и другим видам. Особенно часто в последние годы случаи массового усыхания сосны в Германии [4], Польше [5], Финляндии [6], Словакии [7], Швейцарии [8], Чехии [9] происходят с участием синей сосновой златки – *Phaenops cyanea* Fabricius, 1775 (Coleoptera, Vuprestidae). По мере затухания очагов вершинного короеда аналогичные случаи стали фиксироваться и в лесах Беларуси [10]. Так, при проведении экспедиционного лесопатологического обследо-

вания в 2021 г. выявлено 234,0 га действующих очагов синей сосновой златки, что составляет 38% от общей площади очагов стволовых вредителей в сосняках обследованных лесхозов. Златка уже занимает второе место по площади очагов ксилофагов сосны в Беларуси, а в некоторых лесхозах (Домановский, Слонимский, Мозырский опытный) она преобладает. Нельзя исключать вероятности в республике новой волны массового усыхания сосновых лесов под воздействием комплекса ксилофагов с доминированием *Ph. cyanea*. Учитывая рост хозяйственного значения синей сосновой златки в Беларуси, целесообразно обобщить имеющуюся информацию и наметить пути дальнейших исследований проблемы защиты сосновых лесов от этого вредителя.

Основная часть. *Ph. cyanea* присутствует во всей Палеарктике в равнинных хвойных лесах Евразии [11–13]. В базе данных GBIF (рис. 1) имеется 2601 геопривязанная запись о находках данного вида в Европе, Северной Африке и Турции [14]. В базе данных повреждений леса в Европе (Database on Forest Disturbances in Europe), которая поддерживается Европейским лесным институтом (European Forest Institute), за период с 1990 по 2002 г. имеется 73 записи о находках *Ph. cyanea*, относящиеся к Германии, Австрии, Чехии, Швейцарии, связанные со случаями повреждения и усыхания лесов [14, 15]. Несмотря на огромный ареал, занимаемый *Ph. cyanea*, в последние годы она расширяет его и на западе Европы. Так, появились сообщения об обнаружении златки в ранее незаселенных ею областях Испании [16] и Нидерландах [17].



Рис. 1. Картографическая информация о случаях выявления *Ph. cyanea* из базы данных GBIF [14]

Синяя сосновая златка встречается на различных видах сосен (*Pinus sylvestris* L., *P. pinaster* Ait., *P. halepensis* Mill., *P. nigra* Arnold), на ели европейской (*Picea abies* (L.) H. Karst.), пихте белой (*Abies alba* Mill.), лиственнице сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) [11, 16, 18, 19], но основной кормовой породой в Европе является сосна обыкновенная [11].

Ph. cyanea распространена в равнинных лесах и лишь на юге Европы отмечается в районах с большой высотой над уровнем моря [11, 19]. При этом наиболее часто встречается и вредит в лесах центральной Европы [11, 14].

Изучение хронологии усыхания показывает, что с начала 1990-х годов из ряда европейских стран стали поступать сообщения о случаях массового усыхания древостоев сосны обыкновенной с участием *Ph. cyanea*. К ним можно отнести усыхание сосняков в долине Роны на юго-западе Швейцарии [8], повреждение сосны в 1991–1993 гг. в Северной Саксонии (Германия) с объемом пораженной древесины 45,3 тыс. м³ [4], повреждение в 1992–1993 гг. сосновых древостоев на северо-западе Польши с объемом подлежащей вырубке древесины 780 тыс. м³ [11, 20]. Позднее, в 2016–2021 гг., массовое усыхание сосновых лесов в Польше продолжилось с участием комплекса ксилофагов, что привело к необходимости вырубки в пиковые 2017–2018 гг. 3,0–3,8 млн. м³ древесины погибших сосен соответственно [5, 21]. И если в восточной части страны в комплексе ксилофагов сосны в указанные годы преобладал *I. acuminatus*, то в западной и центральной Польше доминирующая роль принадлежала *Ph. cyanea* [5].

По сообщению А. Совиньской [11], которая ссылается на более ранние публикации других польских авторов, излюбленными местами обитания синей сосновой златки являются спелые и перестойные сосновые насаждения, а также края «окон», которые образуются в лесных культурах сосны, созданных на бывших сельскохозяйственных землях. Часто этот ксилофаг встречается в очагах хвоегрызущих вредителей, грибных болезней, в заподсоченных или ослабленных промышленными выбросами и неблагоприятными абиотическими факторами насаждениях. Это согласуется с нашими наблюдениями, поскольку наиболее часто очаги *Ph. cyanea* в Беларуси формируются в спелых изреженных насаждениях, по периметру «окон», образовавшихся в очагах корневой губки, по опушкам и краям вырубок, т. е. в местах с наибольшей инсоляцией. В подобных условиях – изреженных и заподсоченных насаждениях, гарях, вырубках – формируются очаги златки и в Самарской области России в условиях

степного Заволжья [22]. Результаты исследований показывают, что деревья, заселяемые златкой, произрастают в условиях более теплого микроклимата, чем расположенные рядом незаселенные [20]. При наличии ветровальных и буреломных деревьев *Ph. cyanea* способна заселять их как в сухих, так и во влажных условиях произрастания [22].

Большое практическое значение имеет установление возрастного диапазона деревьев, которые могут заселяться синей сосновой златкой. Хотя при формировании очагов этот вид тяготеет к спелым древостоям [11], но способен успешно развиваться и в молодняках. Так, в условиях Самарской области златка начинает заселять деревья с 8-летнего возраста [22]. В Беларуси в 1975–1981 гг. при энтомологическом анализе деревьев в возрасте до 14 лет в очагах сосновой корневой губки поселения златки на них не обнаруживались [23]. Но в 2021 г. при анализе 22–23-летних сосен в аналогичных условиях в Мозырском опытном лесхозе Гомельской области нами выявлено их активное заселение *Ph. cyanea* [10]. Вероятно, в условиях Беларуси синяя сосновая златка представляет угрозу для сосновых древостоев, начиная со второго класса возраста, при этом верхнего возрастного предела для заселения деревьев этим видом не существует.

Синяя сосновая златка является типичным представителем летнего фенологического комплекса ксилофагов, лет которых растянут и занимает большую часть теплого периода года [24]. По наблюдениям В. Л. Мешковой и др. [25], он начинается при устойчивом переходе среднесуточных температур через +15°C в сторону повышения. Исследователи называют приблизительно одинаковые его сроки: с середины мая до августа [11, 22, 25], с максимумом в июне – июле, хотя в условиях центральной Беларуси при холодной затяжной весне (2020 г.) начало лета смещается на июнь [26].

В связи с растянутостью лета жуков под которой можно одновременно найти личинок разных возрастов, даже в пределах одного дерева (рис. 2) [11, 25]. При этом личинки, не закончившие питание, зимуют в своих ходах, а завершившие его – уходят на зимовку в куколочные колыбельки, которые устраивают во внешнем мертвом слое коры, где и окукливаются (рис. 3) [22]. Синяя сосновая златка является комлевым ксилофагом и питается в камбиальной зоне коры свежим лубом, не задевая заболонь. Но если ее район поселения захватывает зону относительно тонкой переходной коры, то мы наблюдали уход личинок на зимовку и в толщу древесины, что подтверждается и другими авторами [25, 27].



Рис. 2. Личинка синей сосновой златки

В доступной литературе отсутствуют сведения о количестве возрастов у личинок и их продолжительности, а также их выживаемости под корой [11]. Окукливание личинок начинается весной следующего года в мае [11] или, по другим сведениям, во второй половине апреля [22]. Фаза куколки по разным данным длится от 10–12 дней [18, 22], до 1,5–2 недель [28] и даже 2–3 недель [11].



Рис. 3. Куколка синей сосновой златки в куколочной колыбельке

Вероятно, ее продолжительность зависит от географического региона и погодных условий конкретного года. Отродившиеся жуки (рис. 4) некоторое время проводят под корой, а затем покидают куколочные колыбельки, прогрызая характерные овальные отверстия (рис. 5). Они мигрируют в крону, где проходят дополнительное питание на сосновой хвое, выгрызая серповидные погрызы или перегрызая ее. Вначале питание происходит на прошлогодней хвое, а после формирования молодых побегов – на хвое текущего года [20].



Рис. 4. Имаго синей сосновой златки

Жуки живут в среднем 26 дней (до 36 дней) [11], а период активной яйцекладки продолжается около 2 недель [25]. Наибольшую активность они проявляют в жаркие дни с 11 до 17 ч [22]. Самки златки откладывают яйца по одному в трещины и щели коры комлевой части стволов. Эмбриональное развитие длится 3–4 дня или дольше [11, 22]. Отродившиеся личинки прогрызают мертвую корку до луба и питаются живыми тканями коры и камбия. Личиночные ходы зигзагообразные, длиной 15–30 см (чаще около 20 см), располагаются преимущественно в поперечном направлении и плотно забиты коричневой буровой мукой [11]. В процессе питания личинок происходит отмирание тканей дерева выше и ниже ходов. Развитие личинок сопровождается поражением ствола деревоокрашивающими грибами [26], одним из которых может быть *Ceratocystis pilifera* (Fr.) C. Moreau [18].

Предполагается, что *Ph. cyanea* имеет однолетнюю генерацию во всем своем ареале [8, 11, 22, 26], но в некоторых случаях может развиваться по двухлетнему, а иногда даже трехлетнему циклу [27].



Рис. 5. Выходное отверстие овальной формы, образовавшееся после вылета имаго синей сосновой златки

В отличие от короедного заселения дерева, на которых поселилась синяя сосновая златка,

способны длительное время не проявлять никаких внешних признаков развития насекомых. Имаго *Ph. suaneae* не прокладывает ходы под корой, поэтому такие признаки, как входные отверстия насекомых и буровая мука отсутствуют. По мнению А. Совиньской [20] и нашим наблюдениям, первые признаки заселения златкой проявляются в виде изменения окраски хвои: она становится матовой, серовато-зеленой, светлеет, кроны заселенных деревьев выглядят более прозрачными, а затем в летнее время через 2–3 недели приобретают яркий рыжий цвет. На заселенных деревьях можно обнаружить потеки живицы между пластинами коры [20], но по нашим наблюдениям, этот признак не обязательно связан с деятельностью златки. Более надежным методом диагностики является так называемая «топорная проба», т. е. вскрытие коры топором на высоте 1–2 м до луба в виде площадки размером до 1 дм² с целью обнаружения личиночных ходов *Ph. suaneae*. При обнаружении в лубе тонких, напоминающих нити коричневых слегка расширяющихся ходов златки (рис. 6), которые располагаются преимущественно в поперечном направлении, дерево следует считать заселенным независимо от состояния его кроны. По мере роста личинок ходы расширяются (рис. 7).



Рис. 6. Ходы личинок синей сосновой златки на начальной стадии развития

На поздних стадиях отмирания, после гибели живых тканей луба личинки *Ph. suaneae* оставля-

ют за собой плоские расширяющиеся ходы, заполненные пескообразной коричневой буровой мукой, уложенной волнообразно (рис. 8, 9).

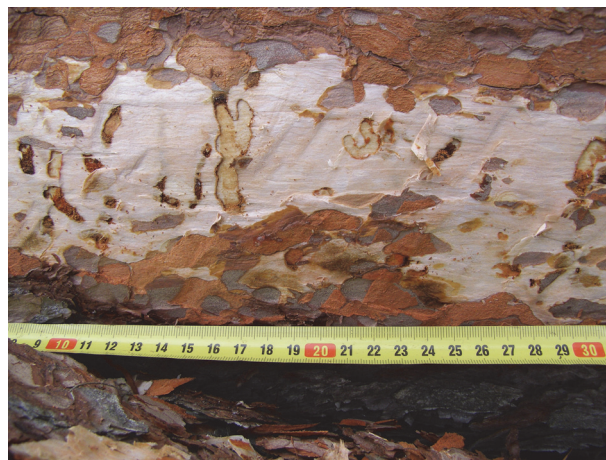


Рис. 7. Ходы личинок синей сосновой златки среднего возраста

В доступной литературе не освещен вопрос о том, сколько времени проходит от заселения дерева златкой до появления первых видимых признаков его отмирания. Мы предполагаем, что при заселении в начале лета (май – июнь) первые признаки усыхания могут появиться в кроне дерева уже к концу августа. Если дерево было заселено в июле – августе, то оно уходит на зимовку бессимптомным, а изменение окраски хвои наступает уже в мае – июне следующего года. Это означает, что период скрытого развития *Ph. suaneae* под корой дерева может составлять от 3 до 9 месяцев в зависимости от времени заселения. Эти предположения нуждаются в проверке на постоянных пробных площадях.

О естественных механизмах регулирования численности популяций синей сосновой златки информации немного. Известно, что засухи и повышенная температура вегетационного периода стимулируют развитие *Ph. suaneae* [6, 8, 11].

На начальном этапе заселения деревьев решающее значение для развития насекомых имеют, вероятно, интенсивность смоловыделения и состав выделяемых деревом летучих веществ [11]. Некоторые авторы предполагают, что паразитизм и хищничество не имеют существенного влияния на развитие популяций златки. Большее значение имеет конкуренция со стороны комлевых жесткокрылых (Coleoptera) ксилофагов, таких как короеды (Curculionidae, Scolytinae): *Tomicus piniperda* Linnaeus, 1758, *Ips sexdentatus* (Börner, 1776), смолевки (Curculionidae, Molytinae): *Pissodes piniphilus* (Herbst, 1797), *P. pini* Linnaeus, 1758; дровосеки (Cerambycidae): *Arhopalus rusticus* Linnaeus, 1758, *Asemum striatum* Linnaeus, 1758 (Aseminae),

Monochamus galloprovincialis Olivier, 1795 и *Acanthocinus aedilis* Linnaeus, 1758 (Lamiinae), которые способны вытеснять златку, осваивая ее кормовой субстрат, и даже уничтожая ее личинок под корой в процессе питания. Из хищников наиболее значимое влияние, по-видимому, оказывают птицы, в частности дятлы [11, 22].



Рис. 8. Ходы личинок синей сосновой златки на заключительной стадии развития, вскрытые дятлами



Рис. 9. Пескообразная буровая мука коричневого цвета, уложенная волнообразно в ходах на внутренней поверхности коры – типичный признак поселения синей сосновой златки

В литературе приводятся некоторые сведения о видовом составе паразитоидов, развивающихся на личинках старших возрастов *Ph. cyanea*. Так, для Самарской области России в качестве паразитоидов златки указываются личинки мух (Diptera) из родов *Medetera* Fisher von Waldheim, 1819 (Dolichopodidae), *Pachygaster* Meigen, 1803 (Stratiomyidae) и *Lonchaea* Fallen, 1820 (Lonchaeidae). Среди перепончатокрылых (Hymenoptera) на златке паразитируют полифаги семейства бракониды (Braconidae): *Coeloides melanostigma* Strand, 1918 и *C. abdominalis* Zetterstedt, 1838, *Atanycolus initiator* Fabricius, 1793,

Doryctes mutillator Thunberg, 1822, ихневмониды (Ichneumonidae): *Xorides depressus* Holmgren, 1860 [22]. Для Московской области указываются наездники *Aulacus striatus* Jurine, 1807 (Aulacidae), *Lissonota lineolaris* Gmelin, 1790, *L. catenator* Panzer, 1804, *Ephialtes spatulatus* Townes, 1960, *Xorides alpestris* Habermehl, 1903, *X. depressus*, *Rhimphoctona grandis* Fonscolombe, 1852, *Atanycolus genalis* Thomson, 1892, *Dolichomitus tuberculatus* Geoffroy, 1785, *Paraperithous gnathaulax* Thomson, 1877, *Odontocolon dentipes* Gmelin, 1790 (Ichneumonidae) [18].

При этом авторами не упоминается, какую роль играют эти виды в регулировании численности хозяина. В условиях Беларуси видовой состав паразитоидов *Ph. cyanea* требует уточнения, так же как и их влияние на популяцию златки. О воздействии хищников и паразитоидов на куколок и имаго *Ph. cyanea* в доступной литературе информации почти нет. Лишь В. В. Филипенкова [22] упоминает о возможности нападения имаго и личинок муравьежуков (*Thanasimus* sp., Cleridae) на куколок и жуков синей сосновой златки, однако наши наблюдения не подтверждают это предположение. И. Е. Зыков [18] констатирует, что роль паразитоидов в смертности вылетевших жуков, по-видимому, незначительна. Гораздо сильнее на степень выживания и продолжительность жизни имаго влияют климатические условия, хищные насекомые и позвоночные животные. Таким образом, факторы смертности для куколок и имаго *Ph. cyanea* еще предстоит установить.

В доступной литературе сведений о порогах вредоносности и хозяйственном значении ущерба в денежном выражении, наносимого синей сосновой златкой, не обнаружено. Но имеются некоторые данные о сравнительной вредоносности этого вида. Так, В. Л. Мешкова и др. [25] в сосновых насаждениях Украины провели оценку вредоносности 53 видов стволовых вредителей сосны по методике Е. Г. Мозолевской [29]. При этом по показателю общей вредоносности наиболее вредоносным видом оказался черный сосновый усач, умеренно вредоносными – 6 видов ксилофагов, в том числе *Ph. cyanea*. Остальные виды были отнесены к маловредоносным или безвредным. Но по показателю физиологической вредоносности, т. е. способности первой заселять деревья и наносить им физиологический вред, синяя сосновая златка вошла в четверку наиболее опасных видов ксилофагов сосны в Украине, наравне с такими вредителями, как черный сосновый усач, большой и малый сосновые лубоеды.

В базе данных ксилофагов Европы ВAW BILT синяя сосновая златка включена в перечень опасных видов, дающих вспышки массо-

вого размножения и наносящих существенный урон лесному хозяйству. Она входит в десятку наиболее вредоносных ксилофагов Европы, т. е. видов, не менее 3 раз получивших оценку максимальной вредоносности при реализации вспышек массового размножения в европейских странах [30].

Попытка ранжировать виды в соответствии с их агрессивностью в сосновых лесах Швейцарии привела к выделению трех групп видов по их способности атаковать деревья с различным уровнем уязвимости. При этом наиболее агрессивными видами были признаны *I. acuminatus* и *Ph. suaneae*, которые способны заселять сосны с потерей хвои до 50% [8].

Методы мониторинга и регулирования численности популяций синей сосновой златки в условиях Беларуси не разработаны. В доступной литературе упоминается о том, что эта проблема актуальна также и для других европейских стран. Из полученного ранее практического опыта вытекает, что значительного изменения численности популяции синей сосновой златки в древостоях, где существует угроза повреждения, можно добиться в первую очередь посредством поиска заселенных деревьев и их удаления с последующей окоркой и сжиганием коры. Но эта работа требует высокой квалификации персонала, наличия у специалистов большого опыта по выявлению заселенных деревьев и должна проводиться систематически, что является трудоемким и дорогостоящим процессом [11, 20].

Одним из методов ограничения численности популяции синей сосновой златки чаще всего рекомендуется использование деревьев-ловушек. В польской инструкции охраны леса [31] предлагается оставлять на корню в солнечных местах 2 ряда ловчих деревьев. В качестве ловчей древесины (ловушки) также используются срубленные неокоренные деревья с толстой корой, положенные на подкладках. Рекомендуется выкладка одной такой ловушки на 1 га леса или двух ловушек на 100 п. м длины опушки (края вырубки) [20]. В Беларуси рекомендации по регулированию численности *Ph. suaneae* сводятся к выкладке ловчей древесины, которую рекомендуется размещать в очагах корневой губки, на прогалинах и опушках в мае – июле, а проводить уничтожение зимующих личинок в сентябре – ноябре, до выпадения снега [32].

Использование пестицидов в насаждениях, поврежденных златкой, как правило, не рекомендуется из-за длительного развития под корой ее личинок, локального характера очагов и высокой миграционной активности имаго. На современном уровне знаний наиболее эффективным методом ограничения численности

популяции вредителя является поддержание хорошего санитарного состояния насаждений и недопущение обнажения стен леса [11].

Методы мониторинга *Ph. suaneae* находятся на начальной стадии развития. Эксперименты по установке ловушек с запаховыми аттрактантами пока не доведены до применения на практике [11]. Определенные надежды дали эксперименты, проведенные А. Совиньской и др. [20] по использованию для мониторинга и регулирования численности вредителей липких лент. Так, липкие ленты из черной пленки шириной 60 см и длиной 100 см, обернутые вокруг дерева на высоте груди и покрытые клеем, могут быть использованы для выявления присутствия *Ph. suaneae* в насаждении, наблюдения за динамикой ее лёта, оценки плотности поселения и прогнозирования угрозы древостоям. Для ограничения численности популяций златки этот метод может применяться в насаждениях с высокой угрозой формирования очагов: на ветровалах, снеголомах, пожарищах и т. п. С этой целью нужно размещать на стоящих деревьях от 5 до 10 лент на 100 м южной стены леса. Исследования в Швейцарских Альпах показали повышение плотности популяции *Ph. suaneae* под корой заселенных деревьев в год наибольшего усыхания древостоев сосны (2003) по сравнению с предыдущими [8]. Это дает надежду на эффективное использование традиционных методов прямого энтомологического анализа заселенных златкой деревьев для прогнозирования численности ее популяции и степени повреждения древостоев. Но для построения модели количественной оценки вероятного усыхания с использованием этого метода пока накоплено недостаточно данных.

Заключение. Результаты проводимых в Беларуси лесопатологических обследований показывают, что по мере снижения интенсивности усыхания сосняков роль вершинного короэда в подкоровом энтомокомплексе сосны сокращается, и первые места начинают занимать другие виды ксилофагов, лучше адаптированные к меняющейся ситуации. Одним из таких видов является синяя сосновая златка, хозяйственное значение которой как вредителя сосновых лесов усиливается в Европе с начала 1990-х годов. В последние годы эти тенденции отчетливо проявились и на территории нашей республики. Вероятной причиной этого могут быть эффекты, связанные с потеплением климата, которое фиксируется в Беларуси с 1989 г. [33]. Кроме того, физиологическое ослабление и последующее массовое усыхание сосновых древостоев под воздействием вершинного короэда содействовало образованию большого количества доступного кормового субстрата для *Ph. suaneae*

в виде комлевых частей усыхающих деревьев, отмирающих от нападения *I. acuminatus*. В результате в Беларуси реализовалась вспышка массового размножения синей сосновой златки, которая проходит относительно незаметно для персонала лесного хозяйства, поскольку оказалась «замаскированной» короедным усыханием сосны. По мере сокращения численности короедов *Ph. cyanea* стала формировать самостоятельные очаги, и ее роль в усыхании сосны возрастает.

В условиях Беларуси исследования по биологии и экологии синей сосновой златки почти не проводились. В настоящий момент мы располагаем лишь отрывочными сведениями об этом вредителе, которых недостаточно для разработки эффективной системы защиты леса. Симптомы заселения сосны *Ph. cyanea* мало знакомы работникам лесной отрасли, поэтому на практике очаги златки в сосняках могут приниматься за короедное усыхание сосны, а статистики по учету ее очагов в масштабах республики пока не существует.

Из доступных на данный момент методов мониторинга и регулирования численности этого вредителя можно рекомендовать визуальное обследование сосняков – потенциальных очагов *Ph. cyanea* (очаги корневой губки, южные и западные опушки леса, периметры вырубок, заподсоченные насаждения, ветровалы) – с использованием «топорной пробы» на «подозри-

тельных» деревьях с признаками ослабления; энтомологический анализ заселенных деревьев; организацию отдельного учета очагов синей сосновой златки в лесной статистике; проведение выборочных и сплошных санитарных рубок в очагах вредителя с вырубкой заселенных деревьев, их окоркой или переработкой; применение дифференцированного подхода к проведению санитарно-оздоровительных мероприятий с установлением градации по срокам их выполнения в зависимости от категорий очагов вредных организмов и времени года.

Профилактические мероприятия должны включать создание смешанных насаждений, поддержание в них достаточной полноты (не ниже 0,7), создание опушек из лиственных пород при посадке лесных культур, профилактику поражения насаждений корневой губкой, в том числе путем применения биопрепаратов для обработки пней при проведении рубок ухода и санитарных рубок.

В настоящий момент основными препятствиями для организации эффективной работы по защите леса от *Ph. cyanea* в Беларуси являются недостаток знаний о биологии и методах регулирования численности этого вида, а также недостаточная осведомленность персонала лесного хозяйства о внешних признаках очагов и способах защиты сосновых насаждений от данного вредителя.

Список литературы

1. Invasive Insect Pests of Forests and Urban Trees in Russia: Origin, Pathways, Damage, and Management Forests / D. L. Musolin [et al.] // Forests. 2022. No. 13. Article number 521. DOI: org/10.3390/f13040521.
2. Замолодчиков Д., Краев Г. Влияние изменений климата на леса России: зафиксированные воздействия и прогнозные оценки // Устойчивое лесопользование. 2016. № 4. С. 23–31.
3. Стратегия адаптации лесного хозяйства Беларуси к изменению климата до 2050 года: утв. постановлением коллегии М-ва лесного хоз-ва Респ. Беларусь 05.12.2019. Минск, 2019. 11 с.
4. Otto L. F., Weddeling B. Möglichkeiten der integrierten Bekämpfung des Kiefernkäfers (*Phaenops cyanea*). Abschlussbericht zum Forschungsprojekt // Schriftenreihe der Saechsischen Landesanstalt fuer Forsten. 1997. Ausgabe 12. S. 1–64.
5. Jabłoński T., Tarwacki G., Sukovata L. Pine Forest Conditions in Poland in 2015–2018 // Pine Forests: Current Status, Existing Challenges and Ways Forward: Proceedings of International Scientific and Practical Conference, Kyiv, 12–13 June 2019. Kharkiv, 2019. P. 83–88.
6. Siitonen J. *Ips acuminatus* kills pines in southern Finland // Silva Fennica. 2014. Vol. 48, no. 4. Article id 1145. DOI: org/10.14214/sf.1145.
7. Spatial occurrence and abundance of five phloeophagous beetle species (Coleoptera) in Scots pine trees (*Pinus sylvestris*) growing on sandy soils / T. Olšovský [et al.] // Folia Oecologica. 2013. Vol. 40, no. 1. P. 84–90.
8. Assessing the role of bark- and wood-boring insects in the decline of Scots pine (*Pinus sylvestris*) in the Swiss Rhone valley / B. Wermelinger [et al.] // Ecological Entomology. 2008. Vol. 33. P. 239–249. DOI: 10.1111/j.1365-2311.2007.00960.x.
9. Liška J., Knížek M., Vélé A. Evaluation of insect pest occurrence in areas of calamitous mortality of Scots pine // Central European Forestry Journal. 2021. Vol. 67. P. 85–90. DOI: 10.2478/forj-2021-0006.
10. Отчет о результатах экспедиционного лесопатологического обследования Барановичского, Волковысского, Домановского, Кличевского, Мозырского опытного, Слонимского, Щучинского лесхозов. Обследование 2021 года. Минск: Белгослес, 2022. 153 с.

11. Sowińska A. Biologia i ekologia przyplaszczka granatka *Phaenops cyanea* (F.) (Col., Buprestidae) – aktualny stan wiedzy // *Leśne Prace Badawcze*. 2006. Nr. 3. S. 83–98.
12. Evans H. F., Moraal L. G., Pajares J. Biology, ecology and economic importance of Buprestidae and Cerambycidae // *Bark and wood boring insects in living trees in Europe, a synthesis* / eds. F. Lieutier [et al.]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004. P. 447–474.
13. Яновский В. М. Аннотированный список жесткокрылых-дендрофагов – основных вредителей лесов России // *Энтомологические исследования в Сибири*. Красноярск, 2004. Вып. 3. С. 73–92.
14. GBIF – the Global Biodiversity Information Facility. URL: www.gbif.org (дата обращения: 08.05.2022).
15. Schelhaas M.-J., Nabuurs G.-J., Schuck A. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries // *Global Change Biology*. 2003. Vol. 9, issue 11. P. 1620–1633. DOI: [org/10.1046/j.1365-2486.2003.00684.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00684.x).
16. Pozo E. del, Garcia F., Monreal J. A. Nota sobre un fuerte ataque del buprestido *Phaenops cyanea* (F.) en un monte de *Pinus nigra* Arnold en la Sierra del Segura. Albacete // *Boletín de Sanidad Vegetal*. 1995. Vol. 21, no. 3. P. 475–479.
17. Teunissen D. Blauwe dennenprachtkever *Phaenops cyanea* (Coleoptera: Buprestidae) nu ook in Nederland waargenomen // *Entomologische Berichten*. 2003. Vol. 63, no. 6. P. 165.
18. Зыков И. Е. Материалы по экологии синей сосновой златки *Phaenops cyanea* F. (Coleoptera, Buprestidae) // *Актуальные проблемы современной экологии и экологического образования: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Москва, 21 апр. 2015 г. Орехово-Зуево, 2015. С. 39–43.*
19. Kailidis D., Markalas S. Trockenperioden und sekundäres Absterben und Borkenkäferepidemien in Wäldern Griechenlands // *Anzeiger fuer Schaedlingskunde Pflanzenschutz Umweltschutz*. 1988. Vol. 61. Ausg. 2. S. 25–30.
20. Sowińska A., Kolk A., Wolski R. Wyniki badań nad nowymi metodami prognozowania i zwalczania przyplaszczka granatka *Phaenops cyanea* (F.) (Coleoptera, Buprestidae) // *Sylvan*. 2000. Nr. 9. S. 17–32.
21. Krótkoterminowa prognoza występowania ważniejszych szkodników i chorób infekcyjnych drzew leśnych w Polsce w 2021 roku / T. Jabłoński [i in.] // *Instytut Badawczy Leśnictwa. Analizy i Raporty*. 2021. Nr. 33. S. 1–144.
22. Филиппенкова В. В. Синяя сосновая златка в лесах Куйбышевской области // *Вопросы лесной биогеоценологии, экологии и охраны природы в степной зоне. Межвузовский сборник*. 1977. Вып. 2. С. 92–96.
23. Душин Н. Г. Стволовые вредители в ослабленных корневой губкой сосновых насаждениях БССР и пути ограничения их численности: дис. ... канд. с.-х. наук. Минск, 1981. 211.
24. Методические рекомендации по надзору, учету и прогнозу массовых размножений стволовых вредителей и санитарного состояния лесов. Пушкино: ВНИИЛМ, 2006. 68 с.
25. Сроки развития стволовых вредителей сосны в Левобережной Украине / В. Л. Мешкова [и др.] // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2015. Вып. 211. С. 59–75.
26. Некоторые биоэкологические особенности синей сосновой златки – *Phaenops cyanea* F. (Coleoptera: Buprestidae) в Беларуси / В. Н. Кухта [и др.] // *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. 375–378.*
27. Sierpiński Z. Nowe dane dotyczące biologii przyplaszczka granatka (*Phaenops cyanea* F.) // *Sylvan*. 1965. Nr. 5. S. 65–70.
28. Воронцов А. И., Семенкова И. Г. Лесозащита. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1988. 336 с.
29. Мозолевская Е. Г. Оценка вредоносности стволовых вредителей // *Вопросы защиты леса*. 1974. Вып. 65. С. 124–132.
30. Gregoire J. C., Evans H. F. Damage and control of BAWBILT organisms, an overview // *Bark and wood boring insects in living trees in Europe, a synthesis* / eds. F. Lieutier [et al.]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004. P. 19–37.
31. Instrukcja ochrony lasu. Warszawa: Centrum Informacyjne Lasow Panstwowych, 2004. 276 s.
32. Рекомендации по применению ловчего материала в сосновых насаждениях (проект). Минск: БГТУ, 2020. 13 с.
33. Логинов В. Ф., Сачок Г. И., Микуцкий В. С. Изменения климата Беларуси и их последствия. Минск: Тонпик, 2003. 330 с.

References

1. Musolin D. L., Kirichenko N. I., Karpun N. N., Aksenenko E. V., Golub V. B., Kerchev I. A., Mandelstam M. Y., Vasaitis R., Volkovitch M. G., Zhuravleva E. N., Selikhovkin A. V. Invasive Insect Pests of Forests and Urban Trees in Russia: Origin, Pathways, Damage, and Management Forests. *Forests*, 2022, no. 13, article number 521. DOI: org/10.3390/f13040521.
2. Zamolodchikov D., Kraev G. Influence of climate change on the forests of Russia: recorded impacts and forecast estimates. *Ustoychivoye lesopol'zovaniye* [Sustainable Forest Management], 2016, no. 4, pp. 23–31 (In Russian).
3. *Strategiya adaptatsii lesnogo khozyaystva Belarusi k izmeneniyu klimata do 2050 goda: utverzhdeno postanovleniyem kollegii Ministerstva lesnogo khozyaystva Respubliki Belarus' 05.12.2019* [Strategy for adaptation of the forestry sector of Belarus to climate change until 2050, approved by the decision of the collegium of the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus on 05.12.2019]. Minsk, 2019. 11 p. (In Russian).
4. Otto L. F., Weddeling B. Possibilities of integrated control of the Steelblue Jewel Beetle (*Phaenops cyanea*). Final report of the research project. *Schriftenreihe der Saechsischen Landesanstalt fuer Forsten* [Publication series of the Saxon State Institute for Forests], 1997, issue 12, pp. 1–64 (In German).
5. Jabłoński T., Tarwacki G., Sukovata L. Pine Forest Conditions in Poland in 2015–2018. *Pine Forests: Current Status, Existing Challenges and Ways Forward: Proceedings of International Scientific and Practical Conference*. Kharkiv, 2019, pp. 83–88.
6. Siitonen J. *Ips acuminatus* kills pines in southern Finland. *Silva Fennica*, 2014, vol. 48, no. 4, article id 1145. DOI: org/10.14214/sf.1145.
7. Olšovský T., Zach P., Kulfan J., Juriková-Matulová Z. Spatial occurrence and abundance of five phloeophagous beetle species (Coleoptera) in Scots pine trees (*Pinus sylvestris*) growing on sandy soils. *Folia Oecologica*, 2013, vol. 40, no. 1, pp. 84–90.
8. Wermelinger B., Rigling A., Schneider Mathis D., Dobbertin M. Assessing the role of bark- and wood-boring insects in the decline of Scots pine (*Pinus sylvestris*) in the Swiss Rhone valley. *Ecological Entomology*, 2008, vol. 33, pp. 239–249. DOI: 10.1111/j.1365-2311.2007.00960.x.
9. Liška J., Knižek M., Vele A. Evaluation of insect pest occurrence in areas of calamitous mortality of Scots pine. *Central European Forestry Journal*, 2021, vol. 67, pp. 85–90. DOI: 10.2478/forj-2021-0006.
10. *Otchet o rezul'tatakh ekspeditionnogo lesopatologicheskogo obsledovaniya Baranovichskogo, Volkovysskogo, Domanovskogo, Klichevskogo, Mozyrskogo opytnogo, Slonimskogo, Shchuchinskogo leskhozov. Obsledovaniye 2021 goda* [Report on the results of an expeditionary forest pathological survey of the Baranovichi, Volkovysk, Domanovsky, Klichevsky, Mozyr experimental, Slonim, Shchuchinsky forestry enterprises. Survey 2021]. Minsk, Belgosles Publ., 2022. 153 p. (In Russian).
11. Sowińska A. Biology and ecology of the Steelblue Jewel Beetle *Phaenops cyanea* (F.) (Col., Buprestidae) – the current state of knowledge. *Leśne Prace Badawcze* [Forest Research], 2006, no. 3, pp. 83–98 (In Polish).
12. Evans H. F., Moraal L. G., Pajares J. Biology, ecology and economic importance of Buprestidae and Cerambycidae. *Bark and wood boring insects in living trees in Europe, a synthesis*. Eds. F. Lieutier [et al.]. Netherlands, Kluwer Academic Publ., 2004, pp. 447–474.
13. Yanovsky V. M. Annotated list of dendrophagous beetles – the main pests of Russian forests. *Entomologicheskiye issledovaniya v Sibiri* [Entomological research in Siberia], Krasnoyarsk, 2004, issue 3, pp. 73–92 (In Russian).
14. GBIF – the Global Biodiversity Information Facility. URL: www.gbif.org (accessed: 08.05.2022).
15. Schelhaas M.-J., Nabuurs G.-J., Schuck A. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biology*, 2003, vol. 9, issue 11, pp. 1620–1633. DOI: org/10.1046/j.1365-2486.2003.00684.x.
16. Pozo E. del, Garcia F., Monreal J. A. Note on a strong attack by the buprestid *Phaenops cyanea* (F.) on a *Pinus nigra* Arnold mount in the Sierra del Segura. Albacete. *Boletín de Sanidad Vegetal* [Plant Health Bulletin], 1995, vol. 21, no. 3, pp. 475–479 (In Spanish).
17. Teunissen D. Steelblue Jewel Beetle *Phaenops cyanea* (Coleoptera: Buprestidae) now also observed in the Netherlands. *Entomologische Berichten* [Entomological Messages], 2003, vol. 63, no. 6, p. 165 (In Dutch).
18. Zykov I. E. Materials on the ecology of the Steelblue Jewel Beetle *Phaenops cyanea* F. (Coleoptera, Buprestidae). *Aktual'nyye problemy sovremennoy ekologii i ekologicheskogo obrazovaniya: materialy*

Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem [Actual problems of modern ecology and environmental education: materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation]. Orekhovo-Zuyevo, 2015, pp. 39–43 (In Russian).

19. Kailidis D., Markalas S. Droughts and secondary diebacks and bark beetle epidemics in forests in Greece. *Anzeiger fuer Schaedlingskunde Pflanzenschutz Umweltschutz* [Indicator for pest science plant protection and environmental protection], 1988, vol. 61, issue 2, pp. 25–30 (In German).

20. Sowińska A., Kolk A., Wolski R. Results of research on new methods of forecasting and controlling the Steelblue Jewel Beetle *Phaenops cyanea* (F.) (Coleoptera, Buprestidae). *Sylvan* [Sylvan], 2000, no. 9, pp. 17–32 (In Polish).

21. Jabłoński T., Iwona S., Tarwacki G., Sukovata L., Ślusarski S., Wolski R., Plewa R., Jaworski T., Grodzki W., Szmidla H., Sikora K., Tkaczyk M. Short-term forecast of the occurrence of major pests and infectious diseases of forest trees in Poland in 2021. *Instytut Badawczy Leśnictwa* [Forest Research Institute], Analyzes and Reports, 2021, no. 33. pp. 1–144 (In Polish).

22. Filippenkova V. V. Steelblue Jewel Beetle in the forests of the Kuibyshev region. *Voprosy lesnoy biogeotsenologii, ekologii i okhrany prirody v stepnoy zone. Mezhvuzovskiy sbornik* [Questions of forest biogeocenology, ecology and nature conservation in the steppe zone. Interuniversity collection], 1977, issue 2, pp. 92–96 (In Russian).

23. Dushin N. G. *Stvolovyye vrediteli v oslablynykh kornevoy gubkoy sosnovykh nasazhdeniyakh BSSR i puti ogranicheniya ikh chislennosti. Dissertatsiya kandidata sel'skokhozyaystvennykh nauk* [Stem pests in pine plantations of the BSSR weakened by the root sponge and ways to limit their numbers. Dissertation PhD (Agriculture)] Minsk, 1981. 211 p. (In Russian).

24. *Metodicheskiye rekomendatsii po nadzoru, uchyotu i prognozu massovykh razmnozheniy stvolovykh vreditel'ey i sanitarnogo sostoyaniya lesov* [Guidelines for the supervision, accounting and forecasting of mass reproduction of stem pests and the sanitary state of forests]. Pushkino, VNIILM Publ., 2006. 68 p. (In Russian).

25. Meshkova V. L., Zinchenko O. V., Skrylnik Yu. E., Aristova A. I. Terms of development of stem pests of pine in the Left-bank Ukraine. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Bulletin of the St. Petersburg Forestry Engineering Academy], 2015, issue 211, pp. 59–75 (In Russian).

26. Kukhta V. N., Sazonov A. A., Seredich M. O., Babul' D. A., Davydenko D. A., Prikota K. N., Ryzhkin P. A. Some bioecological features of the Steelblue Jewel Beetle – *Phaenops cyanea* F. (Coleoptera: Buprestidae) in Belarus. *Lesnyye ekosistemy: sovremennyye vyzovy, sostoyaniye, produktivnost' i ustoychivost': materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 90-letiyu obrazovaniya Instituta lesa NAN Belarusi* [Forest ecosystems: current challenges, state, productivity and sustainability: materials 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. 375–378 (In Russian).

27. Sierpiński Z. New data on the biology of the Steelblue Jewel Beetle (*Phaenops cyanea* F.). *Sylvan* [Sylvan], 1965, no. 5, pp. 65–70 (In Polish).

28. Vorontsov A. I., Semenkova I. G. *Lesozashchita* [Forest protection]. 3rd ed., revised. and additional. Moscow, Agropromizdat Publ., 1988. 336 p. (In Russian).

29. Mozolevskaya E. G. Estimation of harmfulness of stem pests. *Voprosy zashchity lesa* [Problems of forest protection], 1974, issue 65, pp. 124–132 (In Russian).

30. Gregoire J. C., Evans H. F. Damage and control of BAWBILT organisms, an overview. *Bark and wood boring insects in living trees in Europe, a synthesis*. Eds. F. Lieutier [et al.]. Netherlands, Kluwer Academic Publ., 2004, pp. 19–37.

31. *Instrukcja ochrony lasu* [Forest Protection Manual]. Warsaw, Centrum Informacyjne Lasow Panstwowych Publ., 2004. 276 s. (In Polish).

32. *Rekomendatsii po primeneniyu lovchego materiala v sosnovykh nasazhdeniyakh (proyekt)* [Recommendations for the use of trapping material in pine plantations (draft)]. Minsk, BSTU Publ., 2020. 13 p. (In Russian).

33. Loginov V. F., Sachok G. I., Mikutsky V. S. *Izmeneniya klimata Belarusi i ikh posledstviya* [Climate change in Belarus and its consequences]. Minsk, Tonpik Publ., 2003. 330 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

Кухта Валерий Николаевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесозащиты и древесиноведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: v.kukhta80@gmail.com

Романенко Марина Олеговна – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник кафедры лесозащиты и древесиноведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь); научный сотрудник Латвийского государственного лесного исследовательского института «Силава» (LV–2169, г. Саласпилс, ул. Рижская, 111, Латвия). E-mail: romina_mo@bk.ru

Салук Сергей Владимирович – научный сотрудник лаборатории наземных беспозвоночных животных. Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам (220072, г. Минск, ул. Академическая, 27, Республика Беларусь). E-mail: ssaluk@yandex.by

Information about the authors

Sazonov Aleksandr Aleksandrovich – Head of Forest Pathology Department of First Minsk Forest Inventory Expedition. Forest Inventory Republican Unitary Enterprise “Belgosles” (27/1, Zheleznodorozhnaya str., 220089, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lesopatolog@rambler.ru

Kukhta Valery Nikolaevich – PhD (Agricultural), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Forest Protection and Wood Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.kukhta80@gmail.com

Ramanenka Maryna Alegauna – PhD (Agricultural), Senior Researcher, the Department of Forest Protection and Wood Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus); Researcher. Latvian State Forest Research Institute “Silava” (111, Riga str., Salaspils, LV–2169, Latvia). E-mail: romina_mo@bk.ru

Saluk Sergey Vladimirovich – Researcher, the Laboratory of Terrestrial Invertebrates. National-Practical Centre of the National Academie of Sciences of Belarus for Bioresources (27, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ssaluk@yandex.by

Поступила 15.09.2022

ТУРИЗМ И ЛЕСОХОТНИЧЬЕ ХОЗЯЙСТВО

TOURISM AND FOREST HUNTING

УДК 634.737:631.526.325

Д. В. Гордей¹, О. В. Морозов²

¹Белорусский государственный технологический университет

²Белостокский технический университет, Республика Польша

УРОЖАЙНОСТЬ И ПАРАМЕТРЫ ЯГОД МЕЖВИДОВЫХ ГИБРИДОВ ГОЛУБИКИ В КОМБИНАЦИИ СКРЕЩИВАНИЯ (*VACCINIUM CORYMBOSUM* L. (SPARTAN, DUKE) ♀ × *VACCINIUM ANGUSTIFOLIUM* AIT. ♂), КУЛЬТИВИРУЕМЫХ НА ВЕРХОВОМ ТОРФЯНИКЕ БЕЛОРУССКОГО ПООЗЕРЬЯ

В 11-летних посадках урожайность межвидовых гибридов в комбинации скрещивания *V. corymbosum* (Spartan, Duck) ♀ × *V. angustifolium* ♂ изменялась от 47 до 1262 г с куста. Продуктивность 67,6% растений была ограничена значением показателя в 600 г и только у пяти форм она превысила величину в 1000 г. Масса ягод гибридов варьировала от 0,38 до 1,25 г и в среднем составляла 0,68 г. По величине рассматриваемого показателя 86,5% растений превзошли голубику узколистную, масса плодов которой составляет 0,51 г. Доля гибридов с ягодой больше 1 г составила 9,2%. Диаметр ягод гибридного потомства изменялся от 8,2 до 13,1 мм, высота – от 7,0 до 10,6 мм. Для 78,5% гибридов присуще интенсивное развитие воскового налета на плодах, среднее – для 19,0%. И только 2,5% форм полностью лишены эпикутикулярного покрова.

Что касается крупноплодных форм гибридов с массой ягод 1,08–1,25 г, то их урожайность изменялась от 581 до 1107 г, плоды характеризовались восковым налетом средней степени развития и обладали насыщенно-сладким вкусом с легким ароматом черники и слабоуловимой кислинкой. Созревание урожая в период с середины июля и до начала августа обуславливает ориентацию хозяйств на местный рынок свежей ягодной продукции и более северные регионы как нашей страны, так и ближнего зарубежья, транспортировка в которые массово созревающих в аналогичные сроки плодов голубики высокорослой с юга Беларуси будет нецелесообразной.

Ключевые слова: межвидовые гибриды, урожайность, масса ягоды, селекция, верховые торфяники, Белорусское Поозерье.

Для цитирования: Гордей Д. В., Морозов О. В. Урожайность и параметры ягод межвидовых гибридов голубики в комбинации скрещивания (*Vaccinium corymbosum* L. (Spartan, Duke) ♀ × *Vaccinium angustifolium* Ait. ♂), культивируемых на верховом торфянике Белорусского Поозерья // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 73–82. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-24.

D. V. Gordey¹, O. V. Morozov²

¹Belarusian State Technological University

²Bialystok University of Technology, Republic of Poland

YIELD AND PARAMETERS OF BERRIES OF INTERSPECIFIC BLUEBERRY HYBRIDS IN A CROSSING COMBINATION (*VACCINIUM CORYMBOSUM* L. (SPARTAN, DUKE) ♀ × *VACCINIUM ANGUSTIFOLIUM* AIT. ♂) CULTIVATED ON PEAT BOGS IN BELARUSIAN LAKELAND

In 11-year plantings the yield of hybrids in the combination of crossing *V. corymbosum* (Spartan, Duck) ♀ × *V. angustifolium* ♂ varied from 47 to 1,262 g per bush. The productivity of 67.6% of plants was limited by the value of 600 g and in only five forms it exceeded the value of 1,000 g. The mass of hybrid berries varied from 0.38 to 1.25 g and in average reaches 0.68 g. In terms of the value of the indicator under consideration, 86.5% of the plants surpassed lowbush blueberry, the weight of which is 0.51 g. The part of hybrids with berries more than 1 g was 9.2%. The diameter of the berries of hybrid generation varied from 8.2 to 13.1 mm, height – from 7.0 to 10.6 mm. Intensive development of wax

plaque on fruits is typical for 78.5% of hybrids, medium – for 19,0%. And only 2.5% of the forms are completely devoid of cover.

As for the large-fruited forms of hybrids with a berry weight of 1.08–1.25 g, their yield varied from 581 to 1,107 g, fruits were characterized by a medium wax cover and had a rich sweet with a light aroma of bilberry and a slightly detectable acid. The ripening of the crop in the period from mid-July to early August determines the orientation of farms to the local market of fresh berry products and more northern regions, both of our country and neighboring countries, transportation to which, massively ripening in similar periods, highbush blueberries from the south of Belarus will be inappropriate.

Keywords: interspecific hybrids, yield, berry mass, selection, abandoned peat bogs, Belarusian Lakeland.

For citation: Gordey D. V., Morozov O. V. Yield and parameters of berries of interspecific blueberry hybrids in a crossing combination (*Vaccinium corymbosum* L. (Spartan, Duke) ♀ × *Vaccinium angustifolium* Ait. ♂) cultivated on peat bogs in Belarusian Lakeland. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 73–82. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-24 (In Russian).

Введение. Согласно сложившейся голубиководческой практике в южной и частично в центральной агроклиматических зонах Беларуси для получения стабильных и ежегодных урожаев крупной ягоды используют сортовые растения голубики высокорослой. С 2009 г. в северной агроклиматической зоне страны проводится работа по интродукции высокозимостойкого вида, но с преимущественно техническим направлением использования плодов голубики узколистной. Перспективы производства на севере страны ягодной продукции для реализации в свежем виде связаны с межвидовыми гибридами голубики высокорослой и узколистной, способными сочетать в себе как высокую зимостойкость, так и относительную крупноплодность.

Описание методики проведения контролируемого скрещивания в комбинации *V. corymbosum* (Spartan, Duck) ♀ × *V. angustifolium* ♂, а также данные о выявленных особенностях габитуса растений гибридного потомства в условиях возделывания на верховом торфянике Белорусского Поозерья приведены в предыдущих работах [1, 2]. Настоящая статья посвящена оценке эффективности контролируемого опыления двух близкородственных видов североамериканской голубики на основании анализа урожайности и размерно-весовых показателей ягод их потомства с целью селекции крупноплодных гибридов.

Основная часть. С целью получения представления о потенциале нового объекта промышленного культивирования проанализируем информацию о величине показателей продуктивности сортов коммерческой группы полувисокой голубики аналогичного происхождения, а также основные направления их использования. Согласно результатам 15-летних исследований в условиях центральной агроклиматической зоны Беларуси (г. Ганцевичи)

продуктивность сорта Northblue изменялась в пределах 0,3–7,8 кг, Northcountry – 0,3–7,9 кг, Northland – 0,3–4,5 кг. Среднее значение рассматриваемого показателя для первого и второго сортов составило 3,3 кг, третьего – 2,6 кг. Средняя масса ягод сорта Northblue составила 2,0 г, Northcountry – 0,8 г, Northland – 1,3 г [3].

По данным трех лет наблюдений в том же регионе интродукции, но за растениями исключительно в репродуктивной фазе онтогенеза, урожайность сортов изменялась в диапазоне: Northblue – 2,6–7,9 кг (в среднем 5,0 кг), Northcountry – 4,8–8,0 кг (в среднем 6,7 кг). Средняя масса ягод варьировала в пределах 1,84–2,49 г у Northblue и 0,82–1,03 г у Northcountry [4].

В Костромской области Российской Федерации сорт Northblue успешно себя зарекомендовал при посадке в верховой торф, насыпанный слоем 40 см на супесчаную почву. Урожайность растений, защищенных от северного ветра стеной леса, изменялась в течение семи лет наблюдений в пределах от 346 до 6827 г и в среднем составила 3916 г с куста. В посадках на открытой местности продуктивность варьировала от 373 до 6935 г, но в среднем существенно уступала первой локации и составила 2672 г с куста. Средняя масса ягоды изменялась в диапазоне значений от 1,51 до 1,94 г.

На выработанном торфянике с остаточным слоем верхового торфа около 1 м растения сильно страдали от зимнего подмерзания побегов. Урожайность их варьировала по годам от 25 до 6078 г с куста, а среднее значение показателя оказалось минимальным из всех трех мест проведения полевых испытаний – 1289 г с куста. Вполне логичным с учетом указанных выше фактов выглядит заключение авторов о необходимости использования на антропогенно нарушенных землях более зимостойких сортов и селекционные формы голубики [5].

В условиях Ленинградской области продуктивность и средняя масса ягод двух представителей полувысокой голубики в 6-летних посадках составила у сорта Northcontry 382,1 г и 0,7 г, у сорта Northland – 501,2 г и 1,4 г соответственно [6].

В г. Елгава (Латвия) урожайность и средняя масса ягоды четырех сортов полувысокой голубики в 9-летних посадках изменялась следующим образом: Northland – 5,2 кг и 1,1 г, Chippewa – 4,1 кг и 1,8 г, Polaris – 2,3 кг и 1,4 г, Northblue – 1,5 кг и 1,7 г. Все сорта рекомендованы для промышленного культивирования, при этом особое внимание обращено на высокую зимостойкость сортов Polaris, Chippewa и Northblue [7].

На юге Эстонии в многофакторном эксперименте максимальной урожайности сорта Northblue в 1012 г со средней массой ягоды 1,8 г позволил добиться вариант посадки в смесь минеральной почвы и верхового торфа с использованием последнего в качестве мульчи в сочетании с умеренной обрезкой, проведенной тремя годами ранее [8]. При культивировании данного сорта на участке выработанного верхового торфяника с внесением минерального удобрения удалось собрать с куста 2043 г ягод средней массой 2,5 г [9]. В альтернативных вариантах опытов с сортом Northblue в Эстонии урожайность культуры порой была ниже в 7,2–25,9 раз по сравнению с приведенными выше данными [8, 9].

В Эстонии проводится апробация не только классических сортов полувысокой голубики, таких как Alvar и уже упоминавшегося выше Northblue, выведенных путем скрещивания *V. corymbosum* и *V. angustifolium*, но и культиваров финской селекции Aino и Agne, для получения которых дополнительно использовали голубику топяную (*V. uliginosum* L.). По результатам двух лет наблюдений на верховых торфяниках именно сорт Aino превзошел по урожайности всех альтернативных кандидатов с величиной показателя в 651,3 г с куста [10].

В Литве Каунасский ботанический сад при Университете Витовта Великого с 1993 г. проводит работу по созданию собственных сортов полувысокой голубики. Урожайность одного из трех перспективных сеянцев, характеризующегося самой высокой продуктивностью, варьировала по годам от 1,8 до 3,3 кг ягод с куста. Средняя масса ягод всех кандидатов сорта уступает сорту Putte, выбранному в качестве стандарта [11]. Двум формам в последующем были присвоены сортовые названия Danutė и Freda [12].

Если страны вдоль северной границы Беларуси обращают пристальное внимание на полувысокую голубику ввиду запроса на потре-

бительском рынке в подходящем биологическом компоненте для развития промышленного ягодоводства в своих регионах, то государствами-соседями на юге нашей страны с более благоприятными погодно-климатическими условиями данная коммерческая группа голубики оказалась мало востребованной.

В основано исключительно на *V. Польше промышленное голубиководство corymbosum*, ассортимент сортов которой включает представителей культуры с разным сроком созревания плодов – от ранних и до самых поздних [13, 14]. Информация о полувысокой голубике представлена данными о потенциале продуктивности только двух сортов в коллекционных посадках. В Щецине урожайность сортов Putte и Emil составила 728 и 575 г с куста соответственно. Средняя масса ягод первого сорта составила 0,76 г, второго – 0,83 г [15]. В Скерневице максимальная в течение пяти лет наблюдений урожайность сорта Putte составила 1,32 кг, Emil – 1,30 кг [16].

На Украине за исключением сорта Northland, причисленного в стране к высокорослой голубике, в литературных источниках отсутствует какое-либо упоминание о других представителях коммерческой группы полувысокой голубики [17, 18]. Для рекультивации площадей, выбывших из эксплуатации торфяных месторождений, активно используют североамериканские сорта клюквы крупноплодной (*Oxycoccus macrocarpus* (Ait.) Pers.) [19]. С 2005 г. проводится работа по интродукции голубики узколистной для культивирования на кислых лесных и торфяных почвах в зоне Полесья [20].



Рис. 1. Гроздь с ягодами крупноплодной формы полувысокой голубики эстонской селекции в 2015 г. (фото Д. В. Гордея)

К сожалению, не все достижения селекционной работы с межвидовыми гибридами голубики находят отражение в научной литературе. Эстонский фермер Toomas Jaadla получил ряд

перспективных форм полувысокой голубики, которые успешно использует для создания посадок в своем фермерском хозяйстве на площади выбывшего из эксплуатации верхового торфяника. На рис. 1 представлена гроздь с ягодами одной из наиболее крупноплодных форм полувысокой голубики эстонской селекции.

Согласно обобщенным данным литературных источников значение средней массы ягоды сортов полувысокой голубики изменяется от 0,76 до 2,5 г, что не только достоверно превосходит по величине рассматриваемого показателя *V. angustifolium*, но и приближается к отдельным, пусть и не самым крупноплодным, сортам *V. corymbosum*. Урожайность межвидовых гибридов в начале репродуктивной стадии развития находится в диапазоне 1,0–3,5 кг и достигает своего максимума в 6,0–8,0 кг. Потенциальные показатели продуктивности полувысокой голубики детерминированы генотипом сорта, но их фактическая реализация во многом зависит от погодных-климатических и почвенных условий региона интродукции, а также выбранной технологии создания посадок и ухода за ними. Ярким подтверждением тому служит существенная вариация значений урожайности и массы ягод у сорта Northblue в Беларуси, России, Эстонии и Латвии [3–9].

Белорусские и зарубежные ученые сходятся во мнении, что высокие вкусовые качества и биохимическая ценность плодов без сомнения должны быть присущи перспективным сортам и формам полувысокой голубики [12, 21]. Данный аспект выходит за рамки наших исследований, но обязательно должен быть учтен в последующей работе.

Величина показателей ягодной продуктивности всех межвидовых гибридов, как и в нашем конкретном случае, обусловлена в том числе генетическими особенностями, переданными от родителей. В условиях Беларуси урожайность материнского сорта Duck в репродуктивной стадии развития изменяется от 1,1 до 6,8 кг. Средняя масса ягод сорта варьирует от 1,34 до 2,04 г [4]. Второй выбранный для опыления сорт Spartan способен продуцировать 4,5–6 кг ягод диаметром 16–18 мм [22]. Для характеристики совокупности форм голубики узколистной, выступивших источником пыльцы, вполне будет уместно оперировать общими данными о виде. Масса ягод *V. angustifolium* в Белорусском Поозерье изменяется от 0,22 до 0,69 г при среднем значении показателя 0,51 г. Урожайность голубики узколистной варьирует от 191 до 1293 г с куста [23].

Созданные осенью 2010 г. опытные посадки межвидовых гибридов в комбинации скрещивания *V. corymbosum* (Spartan, Duck) ♀ ×

V. angustifolium ♂ вступили в стадию промышленного плодоношения в 2014 г. В первый год было собрано от 50 до 200 г ягод с куста. Более полная реализация потенциала ягодной продуктивности растений наблюдалась после 2015 г.

В вегетационном сезоне 2021 г. урожайность совокупности межвидовых гибридов изменялась от 47 до 1262 г и в среднем составляла 504,6 г. У 67,6% растений предельная масса собранных с куста ягод достигла значения 600 г (рис. 2). Высота кустов представителей данной группы изменялась в диапазоне 32–50 см, и по габитусу они практически ни чем не отличались от родительского вида голубики узколистной. Отдельные низкорослые растения, продуктивность которых не превышала 200 г, находились в угнетенном состоянии, обусловленном избыточным увлажнением площади посадок. Распределение растений с более высокой урожайностью выглядело следующим образом: 601–800 г – 20,2%, 801–1000 г – 9,2%, 1001–1200 г – 1,8%, 1201–1400 г – 1,2%.

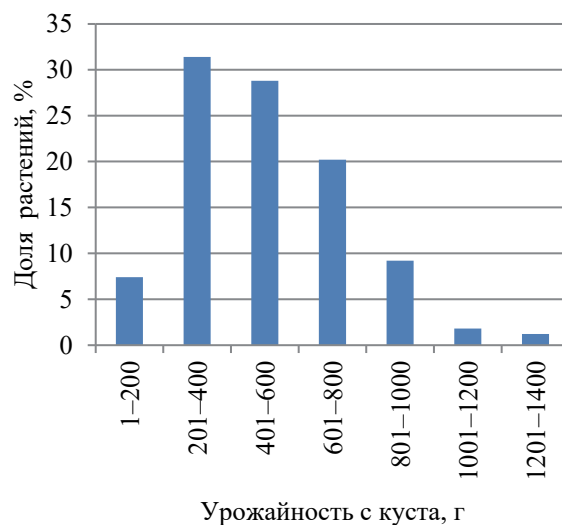


Рис. 2. Распределение межвидовых гибридов голубики по урожайности в 2021 г.

В целом ягодная продуктивность изучаемой группы растений находится в пределах значений, характерных, прежде всего, для голубики узколистной, о чем уже упоминалось выше. Отдельные высокоурожайные растения приблизились по величине рассматриваемого показателя к нижней границе ягодной продуктивности сортов голубики полувысокой и высокорослой.

С учетом специфики наших исследований проводить более детальный анализ урожайности потомства межвидовых гибридов пока преждевременно, поскольку возможность получения ягод с высокими товарно-потребительскими ха-

рактеристиками обусловлена исключительно результатами качественной оценки урожая культуры. Вопросы анализа урожайности мы еще обязательно коснемся, но уже в рамках более узкой группы наиболее перспективных гибридов.

Масса ягод совокупности потомства двух видов изменялась от 0,38 до 1,25 г и в среднем составляла 0,68 г. На долю растений с массой плодов менее 0,5 г пришлось 12,2% (рис. 3). У 68,8% растений масса ягод изменялась в пределах 0,51–0,80 г. Распределение более крупноплодных форм выглядело следующим образом: 0,81–0,90 г – 5,5%, 0,91–1,00 г – 4,3%, 1,01–1,10 г – 1,2%, 1,11–1,20 г – 3,1%, 1,21–1,30 г – 4,9%.

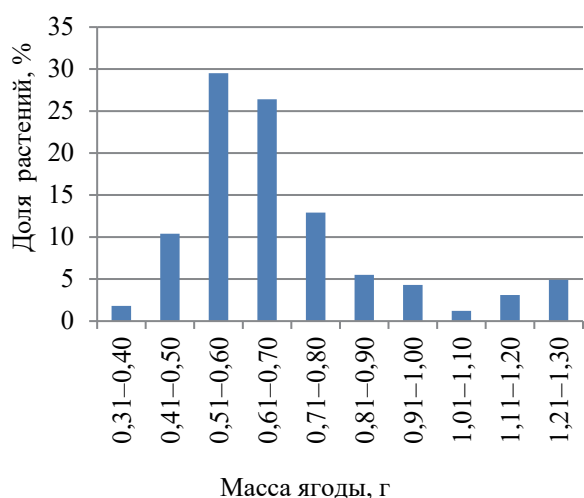


Рис. 3. Распределение совокупности межвидовых гибридов по массе ягоды в 2021 г.

Если по урожайности гибриды в большинстве своем ничем не отличаются от голубики узколистной, то по массе плодов 86,5% потомства превзошло данный родительский вид. Однако им не удалось приблизиться даже к минимальному значению массы ягод сортов Spartan и Duck голубики высокорослой. В сложившейся ситуации объективного компромисса между нашим стремлением получить растения с высокими товарно-потребительскими качествами плодов и реальными возможностями размерно-весовых показателей гибридов совершенно реально достичь при установлении нижнего порога массы ягод для перспективных кандидатов в 1 г. Более легкие ягоды вряд ли смогут привлечь потребителей своей величиной: диаметром, высотой и объемом.

Диаметр ягод гибридного потомства изменялся от 8,2 до 13,1 мм, высота – от 7,0 до 10,6 мм. Среднее значение диаметра рассматриваемой совокупности составляло 10,3 мм, высоты – 9,4 мм.

Интенсивно развитый восковой налет на плодах создавал впечатление привлекательной ярко-голубой окраски у 78,5% гибридов (рис. 4). Эпикуткулярный покров средней интенсивности встречался у 19,0% форм (рис. 5). Доля растений, полностью лишенных воскового налета, не высока и составляла 2,5%.



Рис. 4. Куст гибридного происхождения с интенсивным восковым налетом на ягодах (фото Д. В. Гордея)

С учетом того факта, что из общей совокупности 163 шт. гибридов масса ягод 15 экземпляров превзошла значение показателя в 1 г, можно судить об эффективности контролируемого скрещивания, которая в нашем случае составила 9,2%. Данный результат с абсолютной уверенностью убеждает в возможности проведения эффективной селекционной работы.



Рис. 5. Куст гибридного происхождения с восковым налетом средней интенсивности на ягодах (фото Д. В. Гордея)

Согласно данным таблицы, средняя масса плодов перспективных форм изменяется в пределах 1,08–1,25 г. Однако поскольку отдельные ягоды в структуре урожая культуры достигают веса 1,84 г, представляется возможным повышение значения рассматриваемого показателя путем организации сортировки заготовленных плодов перед их реализацией.

Снижает ценность гибридов полное отсутствие экземпляров с интенсивным восковым налетом на ягодах (таблица). Покров средней степени развития легко стирается, из-за чего плоды приобретают не привлекательную черную окраску. Специальные измерения сопротивления ягод межвидовых гибридов сдавливанию не проводились, но по субъективным ощущениям они имеют более мягкую консистенцию по сравнению с сортами голубики высокорослой. Несомненным достоинством ягод гибридов является их насыщенный сладкий вкус с ярким ароматом черники и слабоуловимой кислинкой.

Из всей совокупности растений гибридного потомства только две формы преодолели порог значения урожайности в 1000 г (таблица). Весьма вероятно, что данные экземпляры представляют селекционную ценность ввиду своих высоких продуктивных качеств, но поскольку их выдающийся результат во многом обусловлен существенным развитием надземной вегетативной сферы, однозначный ответ может быть не столь очевидным. Так, диаметр горизонтальной проекции крон кустов составляет 170 см, а высота варьирует в пределах 90–94 см. Определенную ценность представляют и шесть растений с урожайностью выше 800 г с более низкими параметрами кустов, чем у вышеупомянутой группы. В целом лучшие гибриды по продуктивности достигли минимального значения соответствующего показателя ряда сортов полувысокой голубики и несколько превзошли в данном плане голубику узколистую.

Существенный потенциал роста как урожайности, так и средней массы ягод гибридов кроется в усовершенствовании агротехники их возделывания. Повысить продуктивность вполне реально путем оптимизации уровня грунтовых вод на участке и улучшения условий минерального питания растений. С 2020 г. гибриды возделываются в условиях естественного агрофона, хотя до этого практиковалось ежегодное внесение определенных доз полного удобрения. Для увеличения средней массы ягод целесообразно провести обрезку, к которой еще ни разу не прибегали с момента создания посадок.

Выявление крупноплодных гибридов в репродуктивной стадии онтогенеза не представляет особой сложности даже вне сезона плодоношения. Из общей совокупности растений они заметно выделяются крайне высоким развитием крон в вертикальной плоскости. Если среднее значение высоты гибридного потомства составляет 59,1 см, то величина соответствующего показателя крупноплодных представителей достигает 83–104 см (таблица).

Практически все растения с высотой более 80 см значительно превосходят по массе ягоды среднее значение показателя совокупности гибридов в 0,68 г. При этом в нашем случае доля экземпляров с плодами больше 1,0 г среди высокорослых растений достигла 71,4%.

Научившись распознавать крупноплодные формы еще на стадии ювенильных особей, можно интенсифицировать селекционную работу с межвидовыми гибридами. Классический подход к решению данной задачи основывается на установлении связи между массой ягоды и морфологическими особенностями строения органов растения. Крупноплодность межвидовых гибридов является признаком, унаследованным от голубики высокорослой, для которой характерны более высокие параметры ассимилирующих органов по сравнению с голубикой узколистой. Длина листьев сортов голубики высокорослой в Беларуси изменяется в пределах 6,5–8,5 см, ширина – в диапазоне 2,8–4,2 см [24]. У голубики узколистой длина варьирует в пределах от 1,6 до 4,2 см, ширина – от 0,6 до 2,3 см [23]. У *V. angustifolium* ланцетные листья с пильчатым краем [23], тогда как у родительских сортов *V. corymbosum* ассимиляционные органы имеют эллиптическую форму с цельным краем [24].

В вегетационном сезоне 2021 г. длина листьев гибридного потомства изменялась от 27 до 66 мм и в среднем составляла 40,3 мм. Ланцетная форма присуща для 87,7% гибридов, а эллиптическая – для 12,3%. В большей или меньшей степени пильчатый край листовой пластинки выражен у всех гибридов. Что касается 15 крупноплодных форм, то длина их листьев изменялась в пределах 44–66 мм и в среднем составляла 52,9 мм. Форма листьев – преимущественно эллиптическая со слабоаметным пильчатым краем.

Значение выборочного линейного коэффициента парной корреляции Пирсона (r), равное 0,73, дает основание утверждать о наличии у гибридов сильной прямой зависимости между длиной листьев и массой ягод. Четких связей весового показателя с другими морфологическими признаками ассимиляционного органа не установлено.

Несомненный интерес представляют данные о сроках созревания ягод межвидовых гибридов в условиях верхового торфяника на севере нашей страны. Они позволяют не только определить временной коридор реализации ягодной продукции, но и выработать правильную бизнес-стратегию для новой ягодной культуры с учетом возможных «окон» на рынке.

Характеристика перспективных межвидовых гибридов с массой ягоды больше 1 г в 2021 г.

Гибрид	Урожайность ягод с куста, г	Показатели ягоды				Диаметр кроны, см	Высота куста, см
		масса, г	диаметр, мм	высота, мм	интенсивность воскового налета		
1	581	1,22	12,8	10,1	Средняя	150	100
2	664	1,24	12,9	10,6	Средняя	120	90
3	687	1,10	12,1	10,0	Средняя	100	86
4	706	1,24	12,2	10,3	Средняя	150	90
5	733	1,14	12,0	9,8	Средняя	140	96
6	754	1,08	11,8	9,8	Средняя	130	92
7	782	1,23	12,4	10,2	Средняя	140	90
8	806	1,18	12,4	10,4	Средняя	160	85
9	835	1,23	12,8	10,6	Средняя	107	104
10	849	1,12	12,3	10,1	Средняя	143	90
11	874	1,22	12,3	10,3	Средняя	156	83
12	880	1,25	13,1	10,3	Средняя	150	84
13	951	1,15	12,1	10,4	Средняя	170	87
14	1044	1,18	12,1	10,2	Средняя	170	90
15	1107	1,22	12,4	10,5	Средняя	170	94

Начало массового созревания урожая крупноплодных гибридов в 2021 г. было отмечено в конце III декады июля (27.07.22), что на 7–10 дней позже по сравнению с голубикой узколистной, возделываемой в тех же условиях. В связи с неодновременным созреванием ягод заготовка их осуществлялась в 2–3 приема. Сбор ягод на участке был завершен в конце I декады августа (10.08.21).

В предыдущие годы массовое плодоношение гибридов отмечалось несколько раньше – 16–18 июля. Созревание урожая проходило в более сжатые сроки и оканчивалось в конце июля или первых числах августа. Весьма вероятной причиной изменения динамики сезонного развития в 2021 г. является избыточное увлажнение торфяного субстрата, вызванное нарушением работы мелиоративной сети деятельностью речного бобра (*Castor fiber* L.). Особо отметим, что созревание ягод межвидовых гибридов в августе замедляется, а формирующиеся плоды характеризуются низкими вкусовыми качествами: становятся пресными или кислыми и теряют аромат.

Современный ассортимент сортов голубики высокорослой позволяет организовать на юге Беларуси производство плодов культуры с начала июля и до второй половины сентября (03.07–21.09) [24]. Сроки созревания межвидовых гибридов в Белорусском Поозерье совпадают по времени со средними сортами *V. corymbosum*, массовое появление ягод которых на рынке, как правило, приводит к снижению стоимости плодов. В данной ситуации реализация продукции межвидовых гибридов целесообраз-

на на месте ее выращивания и в районах, расположенных севернее. Растения, к сожалению, не способны заполнить какую-либо новую нишу на голубичном рынке, но без проблем потеснят голубику высокорослую.

В контексте предварительных результатов наблюдения за сортами полувысокой голубики Арне (Arne), Алвар (Alvar), Аино (Aino), Нортблю (Northblue) и Норткантри (Northcountry) отметим не только абсолютную приживаемость всех саженцев, высаженных в 2019–2020 гг., но и их жизнеспособность, подтвержденную результатами осенней ревизии в 2022 г. Растения сорта Northcountry максимально адаптированы к условиям произрастания, активно формируют крону куста с насыщено-зеленой окраской листьев. Сорт Northblue характеризуется самыми низкими темпами развития надземной вегетативной сферы и очень высокой восприимчивостью побегов к отрицательным температурам зимнего периода. В первый год после посадки у сорта Alvar наблюдалось покраснение листьев с последующей преждевременной дефолиацией в конце июля, что весьма вероятно было связано с адаптацией микроклонального саженца к новым условиям произрастания. В 2022 г., на третий год после посадки, у сорта было отмечено появление мелких и черных, без воскового налета, посредственного вкуса сигнальных ягод. Исследования вышеуказанной группы сортов продолжаются, и делать какие-либо выводы пока будет преждевременным.

Заключение. Результаты исследований в полной мере подтверждают возможность результативной селекции крупноплодных гибридов,

адаптированных к условиям Белорусского Поозерья на основе контролируемого скрещивания двух близкородственных видов североамериканских голубик.

Масса ягод изменяется в пределах 1,08–1,25 г при урожайности с куста 581–1107 г. Плоды обладают насыщенно-сладким вкусом с легким ароматом черники и слабоуловимой

кислинкой. Несколько снижает их привлекательность слабый восковой налет. В рамках дальнейшей работы целесообразно провести дополнительные опыления ранних сортов *V. corymbosum* с сортами *V. angustifolium*, а также осуществить серию возвратных скрещиваний исследованных в настоящей статье гибридов.

Список литературы

1. Морозов О. В. Методика и результативность гибридизации голубики узколистной (*Vaccinium angustifolium* Ait.) и голубики высокорослой (*Vaccinium corymbosum* L.) на стадии виргинильных особей // Труды БГТУ. 2014. № 1: Лесное хоз-во. С. 79–81.
2. Гордей Д. В., Морозов О. В. Особенности габитуса межвидовых гибридов голубики в комбинации скрещивания (*Vaccinium corymbosum* L. (Spartan, Duke)♀ × *Vaccinium angustifolium* Ait.)♂, культивируемых на верховом торфянике Белорусского Поозерья // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2022. № 2 (258). С. 109–118.
3. Paulouski M. Particular fruiting of the highbush blueberries (*Vaccinium corymbosum*) different cultivars in the conditions of Belarus // Central European Journal of Experimental Biology. 2020. No. 8 (1). P. 1–11.
4. Курлович Т. В. Габитус и урожайность зрелых растений сортовой голубики в репродуктивной фазе онтогенеза // Опыт и перспективы возделывания голубики на территории Беларуси и сопредельных стран: материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 17–18 июля 2014 г. Минск, 2014. С. 49–56.
5. Макеев В. А., Макеева Г. Ю., Макаров С. С. Результаты испытаний полувысокорослой голубики сорта Northblue в Костромской области // Научные приоритеты АПК в России и за рубежом: сборник статей 72-й науч.-практ. конф. с междунар. участием, Караваево, 22 апр. 2021 г. Караваево, 2021. С. 28–34.
6. Кошман А. И. Оценка таксонов рода *Vaccinium* (голубики) для селекции и практики в условиях северо-запада России: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.05. Орел, 2021. 22 с.
7. Sterne D., Liepniece M., Abolins M. Productivity of some blueberry cultivars under Latvia conditions // Acta Hort. 2012. No. 926. P. 185–189.
8. The effect of mulching and pruning on the vegetative growth and yield of the half-high blueberry / T. Albert [et al.] // Agronomy Research. 2010. No. 8 (1). P. 759–769.
9. Sustainable fertilizer strategies for *Vaccinium corymbosum* × *V. angustifolium* under abandoned peatland conditions / A. Koort [et al.] // Agriculture. 2020. No. 10 (4). P. 121.
10. Influence of soil type on half-highbush blueberry productivity / T. Tasa [et al.] // Agricultural and Food Science. 2012. No. 21 (4). P. 409–420.
11. Cesoniene L., Daubaras R. Breeding of highbush blueberry in Lithuania // Eucarpia 2011: abstract 13th Eucarpia symposium on fruit breeding and genetics, Warsaw, 11–15 september 2011. Warsaw, 2011. P. 96.
12. Selection of new half-highbush blueberry cultivars with higher contents of biologically active compounds / L. Cesoniene [et al.] // Acta Horticulturae. 2016. No. 1139. P. 665–670.
13. Smolarz K. History of highbush blueberry (*V. corymbosum* L.) growing in Poland // Acta Horticulturae. 2006. No. 715. P. 313–316.
14. Smolarz K., Pluta S. Cultivation of the high-bush blueberry in Poland // Acta Horticulturae. 2014. No. 1017. P. 199–204.
15. Ochmian I. Growth, yield and fruit quality two cultivars lowbush blueberry // Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus. 2013. No. 12 (2). P. 87–96.
16. Krzewińska D., Smolarz K., Tryngiel-Gac A. Evaluation of some new blueberry (*Vaccinium* spp.) cultivar in central Poland // *Vaccinium* spp. and Less Known Small Fruits: Book of abstracts International Conference, Nitra, 30 September – 5 October 2007. Nitra, 2007. P. 70–71.
17. Коновальчук В. К. Состояние и перспективы плантационного выращивания брусничных культур в Украине // Перспективы инновационного развития лесного хозяйства: материалы междунар. науч.-практ. конф., Кострома, 25–26 авг. 2011 г. Кострома, 2011. С. 53–58.
18. Коновальчук В. К. Коротка історія вивчення і вирощування та назва рослин з роду *Vaccinium* (*V. angustifolium* Ait., *V. corymbosum* L.) в Україні // Флористичне і ценотичне різноманіття у відновленні, збереженні та охороні рослинного світу: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, Київ 23–25 квітня 2018 р. Київ, 2018. С. 96–97.

19. Коновальчук В. К., Лавренюк Б. В. Рекультивация вироблених торфовищ і вирощування журавлини в умовах Західного Полісся: науково-виробничі рекомендації. Київ: КОМПРИНТ, 2016. 20 с.

20. Коновальчук В. К. Интродукция и селекция голубики узколистной (*Vaccinium angustifolium* Ait.) в условиях Украины // Опыт и перспективы возделывания голубики на территории Беларуси и сопредельных стран: материалы междунар. науч. конф., Минск, 17–18 июля 2014 г. Минск, 2014. С. 45–48.

21. Биохимический состав плодов таксонов рода *Vaccinium* при возделывании на торфяных выработках севера Беларуси / Ж. А. Рупасова [и др.] // Голубиководство в Беларуси: итоги и перспективы: материалы респ. науч.-практ. конф., Минск, 17 авг. 2012 г. Минск, 2012. С. 66–69.

22. Курлович Т. В. Голубика для любителей и профессионалов. М.: ДеЛиБри, 2020. 127 с.

23. Гордей Д. В., Морозов О. В., Буга С. В. Практические рекомендации по выращиванию голубики узколистной (*Vaccinium angustifolium* Ait.). Минск: БГТУ, 2020. 59 с.

24. Курлович Т. В., Босак В. Н. Голубика высокорослая в Беларуси. Минск: Беларус. навука, 1998. 174 с.

25. Paulouski M. B. Phenological development of highbush blueberry various cultivars in Belarus // East European Scientific Journal. 2017. No. 1 (17). P. 12–22.

References

1. Morozov O. V. Methodology and effectiveness of hybridization low bush (*Vaccinium angustifolium* Ait.) and highbush (*Vaccinium corymbosum* L.) blueberries at the virginial stage. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 1: Forestry, pp. 79–81 (In Russian).

2. Gordey D. V., Morozov O. V. Features of the habitus of interspecific blueberry hybrids (*Vaccinium corymbosum* L. (Spartan, Duke) ♀ × *Vaccinium angustifolium* Ait. ♂), cultivated on developed riding peat bogs in Belarusian Lakeland. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2022, no. 2 (258), pp. 109–118 (In Russian).

3. Paulouski M. Particular fruiting of the highbush blueberries (*Vaccinium corymbosum*) different cultivars in the conditions of Belarus. *Central European Journal of Experimental Biology*, 2020, no. 8 (1), pp. 1–11.

4. Kurlovich T. V. Habitus and yield of mature plants of cultivars of blueberries in the reproductive phase of ontogenesis. *Opyt i perspektivy vzdelyvaniya golubiki na territorii Belarusi i sopredel'nykh stran: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Experience and prospects for the cultivation of blueberries in Belarus and neighboring countries: materials of the international scientific-practical conference]. Minsk, 2014, pp. 49–56 (In Russian).

5. Makeev V. A., Makeeva G. Yu., Makarov S. S. The results of tests of half-highbush blueberry of Northblue cultivar in the Kostroma region. *Nauchnyye priority APK v Rossii i za rubezhom: sbornik statey 72-y nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Scientific priorities of the agro-industrial complex in Russia and abroad: a collection of articles of the 72nd scientific and practical conference with international participation]. Karavaevo, 2021, pp. 28–34 (In Russian).

6. Koshman A. I. *Otsenka taksonov roda Vaccinium (golubiki) dlya seleksii i praktiki v usloviyakh severo-zapada Rossii. Avtoreferat dissertatsii kandidata sel'skokhozyaystvennykh nauk* [Assessment of *Vaccinium* (blueberries) taxa for breeding and practice in northwestern Russia. Abstract of thesis PhD (Agriculture)]. Orel, 2021. 22 p. (In Russian).

7. Sterne D., Liepniece M., Abolins M. Productivity of some blueberry cultivars under Latvia conditions. *Acta Horti*, 2012, no. 926, pp. 185–189.

8. Albert T., Karp K., Starast M., Paal T. The effect of mulching and pruning on the vegetative growth and yield of the half-high blueberry. *Agronomy Research*, 2010, no. 8 (1), pp. 759–769.

9. Koort A., Starast M., Pöldma P., Moor U., Mainla L., Maante-Kuljus M., Karp K. Sustainable fertilizer strategies for *Vaccinium corymbosum* × *V. angustifolium* under abandoned peatland conditions. *Agriculture*, 2020, no. 10 (4), p. 121.

10. Tasa T., Starast M., Vool E., Moor U., Karp K. Influence of soil type on half-highbush blueberry productivity. *Agricultural and Food Science*, 2012, no. 21 (4), pp. 409–420.

11. Cesoniene L., Daubaras R. Breeding of highbush blueberry in Lithuania. *Eucarpia 2011: abstract 13th Eucarpia symposium on fruit breeding and genetics*. Warsaw, 2011, p. 96.

12. Cesoniene L., Daubaras R., Kraujalytė V., Venskutonis P. R. Selection of new half-highbush blueberry cultivars with higher contents of biologically active compounds. *Acta Horticulturae*, 2016, no. 1139, pp. 665–670.

13. Smolarz K. History of highbush blueberry (*V. corymbosum* L.) growing in Poland. *Acta Horticulturae*, 2006, no. 715, pp. 313–316.

14. Smolarz K., Pluta S. Cultivation of the high-bush blueberry in Poland. *Acta Horticulturae*, 2014, no. 1017, pp. 199–204.
15. Ochmian I. Growth, yield and fruit quality two cultivars lowbush blueberry. *Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus*, 2013, no. 12 (2), pp. 87–96.
16. Krzewińska D., Smolarz K., Tryngiel-Gac A. Evaluation of some new blueberry (*Vaccinium* spp.) cultivar in central Poland. *Vaccinium spp. and Less Known Small Fruits: Book of abstracts International Conference*. Nitra, 2007, pp. 70–71.
17. Konoval'chuk V. K. State and prospects of plantation cultivation of lingonberry crops in Ukraine. *Perspektivy innovatsionnogo razvitiya lesnogo khozyaystva: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Prospects for innovative forestry development: materials of the International scientific and practical conference]. Kostroma, 2011, pp. 53–58 (In Russian).
18. Konoval'chuk V. K. A brief history of study and cultivation and the name of plants in the genus *Vaccinium* (*V. angustifolium* Ait., *V. corumbosum* L.) in Ukraine. *Floristichne i tsenotichne riznomanittya u vidnovlenni, zberezhennya ta okhoroni roslinnogo svitu: materialy Mizhnarodnoï naukovo-praktichnoï konferentsii* [Floristic and cenotic diversity in the restoration, conservation and protection of the plant world: materials of the international scientific and practical conference]. Kyiv, 2018, pp. 96–97 (In Ukrainian).
19. Konoval'chuk V. K., Lavrenyuk B. V. *Rekul'tivatsiya viroblenikh torfovishch i vyroshchuvannya zhuravlini v umovakh Zakhidnogo Polissya: naukovovo-virobnichi rekomendatsii* [Reclamation of produced peatlands and cranberry cultivation in the conditions of West Polissya: scientific and production recommendations]. Kyiv, KOMPRINT Publ., 2016. 20 p. (In Ukrainian).
20. Konoval'chuk V. K. Introduction and selection of blueberries (*Vaccinium angustifolium* Ait.) in Ukraine. *Opyt i perspektivy vzdelyvaniya golubiki na territorii Belarusi i sopredel'nykh stran: materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Experience and prospects of cultivation of blueberries in Belarus and neighboring countries: materials of the international scientific conference]. Minsk, 2014, pp. 45–48 (In Russian).
21. Rupasova Zh. A., Pavlovskiy N. B., Vasilevskaya T. I., Varavina N. P., Krinitskaya N. B., Pavlovskaya A. G. Biochemical composition of the fruits of *Vaccinium* taxa when cultivated in peat mines in the north of Belarus. *Golubikovodstvo v Belarusi: itogi i perspektivy: materialy respublikanskoï naukovo-prakticheskoy konferentsii* [Blueberry growing in Belarus: results and prospects: materials of the republican scientific and practical conference]. Minsk, 2012, pp. 66–69 (In Russian).
22. Kurlovich T. V. *Golubika dlya lyubiteley i professionalov* [Blueberries for amateurs and professionals]. Moscow, De'Libri Publ., 2020. 127 p. (In Russian).
23. Gordey D. V., Morozov O. V., Buga S. V. *Prakticheskiye rekomendatsii po vyrashchivaniyu golubiki uzkolistnoy (Vaccinium angustifolium Ait.)* [Practical recommendations for growing lowbush blueberry (*Vaccinium angustifolium* Ait.)]. Minsk, BGTU Publ., 2020. 59 p. (In Russian).
24. Kurlovich T. V., Bosak V. N. *Golubika vysokoroslaya v Belarusi* [Highbush blueberry in Belarus]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 1998. 174 p. (In Russian).
25. Paulouski M. B. Phenological development of highbush blueberry various cultivars in Belarus. *East European Scientific Journal*, 2017, no. 1 (17), pp. 12–22.

Информация об авторах

Гордей Дмитрий Васильевич – кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры туризма, природопользования и охотоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: gordey@belstu.by

Морозов Олег Всеволодович – доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой лесоводства и пользования лесом. Белостокский технический университет (15-351, г. Белосток, ул. Сельская, 45Е, Республика Польша). E-mail: a.marozau@pb.edu.pl

Information about the authors

Gordey Dmitriy Vasil'yevich – PhD (Biology), Senior Lecturer, the Department of Tourism, Nature Management and Game Management. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gordey@belstu.by

Morozov Oleg Vcevolodovich – DSc (Biology), Professor, Head of the Department of Forestry and Forest Use. Bialystok University of Technology (45E, str. Wiejska, 15-351, Bialystok, Republic of Poland). E-mail: a.marozau@pb.edu.pl

Поступила 10.10.2022

ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС. ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

TIMBER PROCESSING COMPLEX. TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL QUESTIONS

УДК 630*363.7

А. В. Вавилов^{1,2}

¹Белорусский национальный технический университет

²Белорусский государственный технологический университет

ЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНИКА ДЛЯ ВЫБОРОЧНЫХ РУБОК И ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЯ

В статье отмечена необходимость существенного снижения затрат на проведение выборочных рубок по причине растущих объемов выполнения таких работ. Затраты можно снизить путем выбора наиболее эффективной техники для срезания деревьев, подлежащих удалению, и их вывозки для дальнейшего использования. Для этого применяются специальные компактные и маневренные харвестеры и форвардеры, а лучше машина, которая объединяет в себе качества харвестера и форвардера. В статье приведены краткие сведения о харвестере и форвардере шведской компании VIMEK, которые хорошо себя показали в эксплуатации в лесхозах Беларуси.

В связи с санкциями в отношении нашей страны требуется создание аналогичных харвестеров и форвардеров, т. е. необходимо импортозамещение.

Проанализированы многие средства механизации, применяемые в Беларуси для расчистки лесосек от порубочных остатков и пней с целью успешного выполнения на них лесовосстановительных работ. В лесхозах республики хорошо зарекомендовали себя мульчеры компании PRINOTH, которые из-за санкций также следует заменить отечественными аналогами.

Ключевые слова: выборочные рубки, харвестеры, форвардеры, комбинированная машина, лесовосстановление, мульчеры.

Для цитирования: Вавилов А. В. Эффективная техника для выборочных рубок и лесовосстановления // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 83–87. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-08.

A. V. Vavilov^{1,2}

¹Belarusian National Technical University

²Belarusian State Technological University

EFFICIENT TECHNOLOGY FOR SELECTED FELLING AND FOREST REGENERATION

The article noted the need for a significant reduction in the cost of selective logging due to the growing volume of such work. Costs can be reduced by choosing the most efficient technique for cutting trees to be removed and hauling them away for later use. For this, special compact and maneuverable harvesters and forwarders are used, or better, a machine that combines the qualities of a harvester and a forwarder. The article provides brief information about the harvester and forwarder of the Swedish company VIMEK, which have shown themselves well in operation in the forestry enterprises of Belarus.

In connection with the sanctions against our country, the creation of similar harvesters and forwarders is required, i. e. import substitution is needed.

Many means of mechanization used in Belarus for clearing logging sites from logging residues and stumps are analyzed in order to successfully carry out reforestation work on them. In the forestry enterprises of the republic, PRINOTH mulchers have proven themselves well, which, due to sanctions, should also be replaced with domestic counterparts.

Keywords: selective felling, harvesters, forwarders, combined machine, forest regeneration, mulchers.

For citation: Vavilov A. V. Efficient technology for selected felling and forest regeneration. *Processing of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 83–87. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-08 (In Russian).

Введение. Рубки ухода проводятся с целью повышения продуктивности лесов будущего. До недавнего времени в больших объемах рубки ухода выполнялись вручную и ручными машинами (механизированным инструментом), что приводило к большим затратам [1–7].

В целях снижения затрат предлагается выбирать из всех известных самую эффективную технику в виде харвестеров и форвардеров, а с учетом санкций в отношении Беларуси – создавать аналогичную отечественную.

Подобные предложения касаются расчистки лесосек от порубочных остатков и пней перед проведением лесовосстановительных работ.

Основная часть. Выборочные рубки проводятся в порядке выполнения рубок ухода за лесом [8, 9].

До недавнего времени в больших объемах рубки ухода выполнялись вручную и ручными машинами, что приводило к большим затратам [1–7]. С целью повышения продуктивности лесов будущего и в связи с большой потребностью в древесине прогнозируется увеличение объемов выборочных рубок.

Для существенного снижения затрат на проведение выборочных рубок их необходимо выполнять эффективной маневренной техникой. Такую технику в Беларуси реализует шведская компания Vimek AB. Это харвестер Vimek 404 SE (рис. 1), форвардер Vimek 610 SE (рис. 2) и комбинированная машина Vimek 610 SE BioCombi (рис. 3), которая одна выполняет функции харвестера и форвардера.

Ниже приведены их краткие технические характеристики.

Техническая характеристика харвестера Vimek 404 SE

Мощность двигателя 50 кВт

Угол поворота колес 80°

Трансмиссия гидромеханическая

Дорожный просвет 0,4 м

Колесная база 2,1 м

Ширина 1,80–1,89 м

Вес 4700 кг

Вылет крана-манипулятора 4,60 м, угол поворота 250°

Максимальный диаметр спиливаемого дерева 30 см



Рис. 1. Харвестер Vimek 404 SE



Рис. 2. Форвардер Vimek 610 SE

Техническая характеристика форвардера Vimek 610 SE

Мощность двигателя 50 кВт

Угол поворота рамы 45°

Трансмиссия гидромеханическая

Скорость 0–18 км/ч

Дорожный просвет 0,4 м

Ширина 1,80–1,88 м

Длина 7,0 м (длина грузового отсека 3,15 м,

2 пары стоек, загрузочная площадь 1,85 м²)

Вес 4910 кг

Грузоподъемность 5000 кг

Вылет крана до 6,5 м, угол поворота 270°

Техническая характеристика комбинированной машины Vimek 610 SE BioCombi

Мощность двигателя 50 кВт

Угол поворота рамы 45°

Трансмиссия гидромеханическая

Скорость 0–18 км/ч

Дорожный просвет 0,4 м

Ширина 1,80–1,88 м

Длина 6,90 м

Вес 4990 кг
 Грузоподъемность 5000 кг
 Вылет крана до 6,5 м, угол поворота 270°
 Максимальный диаметр валки 30 см



Рис. 3. Комбинированная машина Vimek 610 SE BioCombi

Машины, которые были описаны выше, приобретены многими лесхозами Беларуси и хорошо себя показали на проведении рубок ухода. Приведенные краткие технические характеристики показывают, что эти машины хорошо вписываются в лесную среду, не нарушая ее, и дают остающимся деревьям хорошо расти и развиваться. Это прежде всего благодаря шарнирно-сочлененной раме и небольшим габаритам [10].

Но в то же время возникшие санкции в отношении Республики Беларусь ставят задачей создать отечественное производство аналогичных машин.

Похожую задачу предстоит решить и в отношении мульчеров, которые позволяют на лесосеках избавляться от порубочных остатков и пней, тем самым не мешая созданию лесных культур, и одновременно получать органическое удобрение для успешного роста этих культур [11–15].

Мульчеры в Беларуси созданы многими предприятиями: ОАО «Амкодор – управляющая компания холдинга», Фанипольский опытно-механический завод, ОАО «Могилевлифтмаш» и рядом других.

Одни мульчеры позволяют измельчать надземную растительность, включая пни, другие измельчают и корневые системы, погружая рабочий орган на глубину до 25 см (рис. 4).

Как сообщалось в Белорусской лесной газете, наиболее удачным оказался мощный мульчер, приобретенный Борисовским опытным лесхозом. Аналогов такой техники в республике не существует, поэтому, изучив опыт эксплуатации импортного мульчера в Борисовском районе, белорусским предприятиям, накопившим опыт создания мульчеров, целесообразно взяться за разработку аналогичной машины.

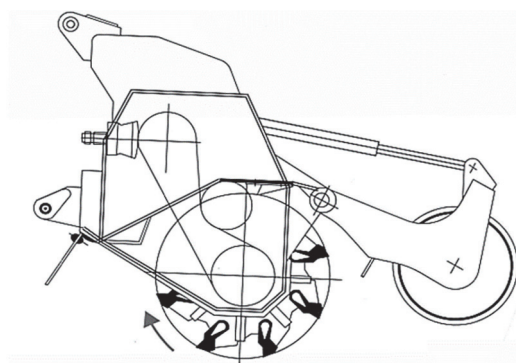


Рис. 4. Рабочий орган мульчера

Заключение. В настоящее время выросла актуальность проведения выборочных рубок, так как давно установлено, что они являются одним из основных приемов повышения продуктивности лесов и дополнительным источником древесного сырья, необходимость в котором выросла.

Учитывая большое количество ручных машин, применяемых на выборочных рубках, для снижения затрат на их проведение рекомендуется создание отечественных харвестеров и форвардеров с параметрами, аналогичными таким же у машин шведской компании ВИМЕК, которые успешно эксплуатируются в лесхозах Беларуси.

Проанализированы многие средства механизации, применяемые в Республике Беларусь для расчистки лесосек от порубочных остатков и пней с целью успешного выполнения на них лесовосстановительных работ. В лесхозах Беларуси хорошо зарекомендовали себя мульчеры компании PRINOTH, которые реализуются предприятием «Аммак-Бел» (Республика Беларусь). С учетом санкций в отношении Беларуси рекомендуется создание отечественных аналогичных машин.

Список литературы

1. Вавилов А. В., Моисеев А. О. Предпосылки создания мульчера для расчистки лесных площадей // Труды БГТУ. 2013. № 2. Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 26–28.
2. Вавилов А. В., Лобанов Е. А. Эффективное рабочее оборудование для расчистки полосы отвода дорог от древесной растительности и производство мульчи // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2019. № 2. С. 170–173.
3. Вавилов А. В. Топливо из нетрадиционных энергоресурсов. Минск: СтройМедиаПроект, 2014. 90 с.

4. Вавилов А. В. Пеллеты в Беларуси: производство и получение энергии. Минск: Стринко, 2012. 162 с.
5. Вавилов А. В. Брикетты из возобновляемых биоэнергоисточников. Минск: Стринко, 2013. 75 с.
6. Вавилов А. В. ТКО целлюлозобитумосодержащие и минерального происхождения: получение вторичных продуктов. Минск: Жилкомиздат, 2018. 160 с.
7. Вавилов А. В. Механизация подготовительных работ при лесовосстановлении. Минск: Ураджай, 1985. 47 с.
8. Правила рубок леса в Республике Беларусь: постановление М-ва лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 19 дек. 2016 г., № 8 // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21631584&p1=1> (дата обращения: 05.10.2022).
9. Руководство по организации и проведению рубок в лесах Республики Беларусь / М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь. Минск, 2006. 81 с.
10. Федоренчик А. С., Протас П. А., Хотянович А. И. Повышение эффективности эксплуатации системы машин «харвестер – форвардер» // Наука и инновации вузов – производству: взаимодействие, эффективность, перспективы: сб. ст. и тез. науч.-практ. семинара, Минск, 22–23 мая 2007 г. Минск, 2008. С. 78–80.
11. Вавилов А. В. Технологические аспекты и оборудование для получения энергии из биотоплива // Вестник БНТУ. 2004. № 1. С. 68–73.
12. Вавилов А. В. Пашковский М. Н., Соколовский Ю. В. Современная технология и техника для производства топливной щепы // Лесопромышленник. 2008. № 8. С. 22–23.
13. Вавилов А. В. Необходим эффективный механизм топливообеспечения энергоустановок на биомассе // Энергоэффективность. 2005. № 3. С. 7.
14. Вавилов А. В. Еще раз об эффективности использования местного древесного топлива // Энергоэффективность. 2008. № 4. С. 17–18.
15. Вавилов А. В. Дополнительные резервы топливной древесины и пути их использования в Беларуси // Энергоэффективность. 2009. № 5. С. 12–13.

References

1. Vavilov A. V., Moiseev A. O. Prerequisites for creating a mulcher for clearing forest areas. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 26–28 (In Russian).
2. Vavilov A. V., Lobanov E. A. Efficient working equipment for clearing the road right of way from woody vegetation and mulch production. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2019, no. 2, pp. 170–173 (In Russian).
3. Vavilov A. V. *Toplivo iz netraditsionnykh energoresursov* [Fuel from non-traditional energy resources]. Minsk, StroyMediaProekt Publ., 2014. 90 p. (In Russian).
4. Vavilov A. V. *Pellety v Belarusi: proizvodstvo i polucheniye energii* [Pellets in Belarus: production and energy production]. Minsk, Strinko Publ., 2012. 162 p. (In Russian).
5. Vavilov A. V. *Brikety iz vozobnovlyayemykh bioenergoistochnikov* [Briquettes from renewable bio-energy sources]. Minsk, Strinko Publ., 2013. 75 p. (In Russian).
6. Vavilov A. V. *TKO tsellyulozobitumosoderzhashchiye i mineral'nogo proiskhozhdeniya: polucheniye vtorichnykh produktov* [MSW of cellulose-bitumen-containing and mineral origin: obtaining secondary products]. Minsk, Zhilkomizdat Publ., 2018. 160 p. (In Russian).
7. Vavilov A. V. *Mekhanizatsiya podgotovitel'nykh rabot pri lesovosstanovlenii* [Mechanization of preparatory work during reforestation]. Minsk, Uradzhay Publ., 1985. 47 p. (In Russian).
8. Rules of logging in the Republic of Belarus: Resolution of the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus, 19.12.2016, no. 8. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21631584&p1=1> (accessed 05.10.2022) (In Russian).
9. *Rukovodstvo po organizatsii i provedeniyu rubok v lesakh Respubliki Belarus'* [Guidelines for organizing and conducting cuttings in the forests of the Republic of Belarus]. Minsk, 2006. 81 p. (In Russian).
10. Fedorenchik A. S., Protas P. A., Khotyanovich A. I. Improving the operational efficiency of the harvester – forwarder machine system. *Nauka i innovatsii vuzov – proizvodstvu: vzaimodeystviye, effektivnost', perspektivy: sbornik statey i tezisov nauchno-prakticheskogo seminara* [Science and innovation of universities – production: interaction, efficiency, prospects: a collection of articles and abstracts of a scientific and practical seminar]. Minsk, 2008, pp. 78–80 (In Russian).
11. Vavilov A. V. Technological aspects and equipment for obtaining energy from bio-fuel. *Vestnik BNTU* [Bulletin of BNTU], 2004, no. 1, pp. 68–73 (In Russian).
12. Vavilov A. V., Pashkovsky M. N., Sokolovsky Yu. V. Modern technology and equipment for the production of fuel chips. *Lesopromyshlennik* [Lumberjack], 2008, no. 8, pp. 22–23 (In Russian).

13. Vavilov A. V. An effective mechanism of fuel supply for biomass power plants is needed. *Energoeffektivnost'* [Energy efficiency], 2005, no. 3, p. 7 (In Russian).
14. Vavilov A. V. Once again about the efficiency of using local wood fuel. *Energoeffektivnost'* [Energy efficiency], 2008, no. 4, pp. 17–18 (In Russian).
15. Vavilov A. V. Additional reserves of fuel wood and ways of their use in Belarus. *Energoeffektivnost'* [Energy efficiency], 2009, no. 5, pp. 12–13 (In Russian).

Информация об авторе

Вавилов Антон Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механизация и автоматизация дорожно-строительного комплекса». Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, Республика Беларусь); профессор кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: ftkcdm@bntu.by

Information about the author

Vavilov Anton Vladimirovich – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department “Mechanization and Automation of the Road-Building Complex”. Belarusian National Technical University (65, Nezavisomosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus); Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ftkcdm@bntu.by

Поступила 07.10.2022

УДК 630*377.4

А. А. Духовник, С. П. Мохов

Белорусский государственный технологический университет

**ОЦЕНКА МЕТОДОВ И ПРИЕМОВ ПРОВЕДЕНИЯ РУБОК УХОДА ЗА ЛЕСОМ
СИСТЕМОЙ МАШИН «ХАРВЕСТЕР – ФОРВАРДЕР»
В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ (ОБЗОР)**

Важнейшей задачей современного лесного хозяйства является повышение продуктивности лесов и рациональное использование лесных ресурсов. Эта задача решается комплексом мер, ведущее место среди которых занимают рубки ухода за лесом. Они включают в себя ряд мероприятий по выращиванию леса в целях повышения и улучшения его продуктивности, увеличения размера лесопользования и лучшего использования леса как фактора окружающей среды. Повышение продуктивности лесов является одной из важных и сложных проблем современного лесоводства. Выращивание высокопродуктивных насаждений оптимального состава требует проведения регулярных уходов за лесом. В Республике Беларусь рубки ухода осуществляются различными системами машин и методами, каждый из которых имеет свои особенности и эффективность в зависимости от условий эксплуатации.

В данной статье выполнена оценка эффективности рубок ухода за лесом в условиях лесохозяйственных учреждений Республики Беларусь с применением машинных комплексов. Отмечены важнейшие цели развития лесного хозяйства страны, среди которых выделяются обеспечение формирования высокопродуктивных и устойчивых лесов, а также повышение ресурсного потенциала лесов для удовлетворения потребностей экологии и общества. Проанализированы и предложены методы и приемы проведения рубок ухода за лесом в условиях Республики Беларусь, рассмотрены технологические процессы при освоении лесосек. Произведено сравнение применяемых систем машин на базе бензиномоторных пил и харвестеров, на основании которого можно осуществлять обоснованный выбор систем машин под соответствующие методы и приемы проведения рубок ухода, отмеченные в данной статье.

Ключевые слова: рубки ухода за лесом, система машин, технология, харвестер, форвардер, лесосека, лесозаготовка.

Для цитирования: Духовник А. А., Мохов С. П. Оценка методов и приемов проведения рубок ухода за лесом системой машин «харвестер – форвардер» в Республике Беларусь (обзор) // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 88–97. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-09.

A. A. Dukhovnik, S. P. Mokhov

Belarusian State Technological University

**EVALUATION OF METHODS AND TECHNIQUES FOR PREPARATION FELLING
BEHIND THE FOREST WITH A SYSTEM OF MACHINES
“HARVESTER – FORWARDER” IN THE REPUBLIC OF BELARUS (REVIEW)**

The most important task of modern forestry is to increase the productivity of forests and rational use of forest resources. This task is solved by a set of measures, the leading place among which is occupied by forest thinning. They include a range of activities to grow the forest in order to increase and improve its productivity, increase the size of forest use and make better use of the forest as an environmental factor. Increasing the productivity of forests is one of the important and complex problems of modern forestry. Growing highly productive stands of optimal composition requires regular forest maintenance. In the Republic of Belarus, thinning is carried out by various systems of machines and methods, each of which has its own characteristics and efficiency depending on the operating conditions.

This article evaluates the effectiveness of thinning for forest care in the conditions of forestry institutions of the Republic of Belarus using machine systems. The most important goals for the development of the country's forestry are noted, among which are the provision of the formation of highly productive and sustainable forests, as well as increasing the resource potential of forests to meet the needs of the environment and society. Methods and techniques for carrying out thinning for forest care in the conditions of the Republic of Belarus are analyzed and proposed, technological processes are considered during the development of cutting areas. A comparison of the used machine systems based

on gasoline-powered saws and harvesters was made, on the basis of which it is possible to make a reasonable choice of machine systems for the relevant methods and techniques for thinning, noted in this article.

Keywords: thinning, machine system, technology, harvester, forwarder, logging site, logging.

For citation: Dukhovnik A. A., Mokhov S. P. Evaluation of methods and techniques for preparation felling behind the forest with a system of machines “harvester – forwarder” in the Republic of Belarus (review). *Processing of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 88–97. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-09 (In Russian).

Введение. Одной из важнейших целей развития лесного хозяйства страны является обеспечение формирования высокопродуктивных и устойчивых лесов, повышение ресурсного потенциала лесов для удовлетворения потребностей экологии и общества. Данные цели отражены в государственных программах и стратегиях (Государственная программа «Белорусский лес» до 2025 г., стратегический план развития лесного хозяйства до 2030 г. и др.) [1, 2].

Для реализации поставленных целей одним из важнейших направлений интенсивного лесного хозяйства является качественное и своевременное проведение рубок ухода, где все большее применение находят машинные комплексы с широким диапазоном технических характеристик технологического оборудования и базового шасси [3–5]. Целью исследования является изучение методов и приемов проведения рубок ухода за лесом в Республике Беларусь.

Основная часть. Рубки ухода за лесом являются одним из важнейших лесохозяйственных мероприятий, направленных на выращивание хозяйственно ценных, высокопродуктивных, качественных насаждений и улучшение других полезных свойств леса, увеличение объема лесопользования в соответствии с технологическими требованиями, установленными СТБ 1361-2002 «Устойчивое лесопользование и лесопользование. Рубки промежуточного пользования. Требования к технологиям» [6–8]. Они заключаются в периодической вырубке из насаждений нежелательных деревьев и кустарников для создания благоприятных условий роста лучшим деревьям главных пород и служат

источником получения древесины и другого сырья [9–12].

Со временем лесные насаждения изменяются. Это происходит из-за появления больных и поврежденных вредителями стволов деревьев, сухостоя, повышения густоты лесных массивов [13]. Как правило, виды рубок ухода зависят от возраста леса (на момент проведения). Их соответствие с возрастом насаждений отражено в Правилах рубок леса в Республике Беларусь [14]. Выделяют следующие виды рубок ухода: осветление, прочистка, прореживание и проходная рубка (таблица).

В решении проблем лесного хозяйства Республики Беларусь важную роль играет внедрение современных технологий и механизация производственных процессов, обеспечивающих необходимое качество работы, снижение трудоемкости и повышение экономической эффективности лесохозяйственной деятельности, особенно при проведении рубок ухода за лесом. В настоящее время в Республике Беларусь для проведения рубок ухода за лесом используют как бензиномоторные пилы, так и системы машин «харвестер – форвардер» [15–17].

Сравнение систем машин для проведения рубок ухода за лесом на базе бензиномоторных пил и харвестеров позволяет сделать вывод, что одной из главных причин массового перехода на механизированное проведение рубок ухода является недостаток рабочей силы. На данный момент во многих регионах проблематично набрать бригаду вальщиков, поскольку количество людей, работающих в сельской местности, заметно сократилось в последние годы.

Виды рубок ухода

Вид рубок ухода	Возраст насаждений, лет			
	хвойных	лиственных		
		дуба, ясеня, клена семенного и смешанного происхождения	березы, ольхи черной, липы, граба	тополя, осины, ольхи серой
Осветление	1–10	1–10	1–10	До 5
Прочистка	11–20	11–20	11–20	6–10
Прореживание	21–40	21–40	21–30	11–20
Проходная рубка	41 и выше	41 и выше	31 и выше	21 и выше

В связи с этим проведение технологий рубок ухода за лесом с применением многооперационных лесозаготовительных машин типа харвестер и форвардер стало более рациональным, поскольку эта система машин обеспечивает высокую производительность труда при соблюдении лесоводственных и экологических требований [18–20]. Особенности проведения рубок ухода за лесом с использованием данных машин, в отличие от применения бензиномоторных пил, являются: механизация операций лесозаготовительного процесса, вырубка деревьев без предварительного отбора и маркировки (с учетом опыта и квалификации оператора харвестера), улучшение условий труда, повышение степени безопасности труда и снижение травматизма, сокращение сроков заготовки древесины и др. [21–23].

На рубках ухода в Республике Беларусь находят применение малогабаритные лесозаготовительные машины компаний Vimek, Rotne, Sampo Rosenlew, «Амкодор», Usewood, Logbullet, Ponsse Fox и др.

Организация рубок ухода за лесом включает в себя разбивку лесосеки на технологические элементы, в том числе устройство технологических коридоров (волоков) и погрузочных площадок. В зависимости от вида рубок, применяемых машин и характеристик лесного фонда [24, 25] могут применяться *методы с прокладкой волоков и без их устройства*.

При использовании метода освоения лесосек с *прокладкой технологических коридоров* необходимо вырубать целый ряд деревьев, в том числе лучших и главных пород [26–29]. Применяется данный метод тогда, когда необходимо обеспечить беспрепятственное движение лесных машин, ширина которых 2 м и более. Технологический коридор при этом получается шириной 3,5–4 м, т. е. необходимо вырубать его шириной, равной квартальной просеке лишь для того, чтобы произвести трелевку (вывозку) заготовленных сортиментов к местам их складирования. При данных условиях находят применение такие машины, как МЛХ-46, «Амкодор 2531», «Амкодор 2541» на проходных рубках ухода, реже на прореживании. В некоторых случаях при проведении таких рубок с использованием машин на базе Vimek при трелевке лесоматериалов ввиду большого радиуса поворота загруженного форвардера приходится также прорубать технологический коридор [30, 31].

Метод разработки лесосек *без прокладки технологических коридоров* основывается на применении машин Vimek, Usewood, Logbullet. При этом машины двигаются криволинейно между деревьями, технологический коридор не

прорубается, но намечается траектория их движения. Однако необходимо учитывать, что эта траектория должна позволять проезжать форвардеру с лесоматериалами, ввиду того что там, где может проехать харвестер, не всегда есть возможность проехать форвардеру.

Исходя из способа рубки и выбранных машин, прокладка коридоров может совершаться как прямолинейным способом, так и криволинейным. *Прямолинейный* способ упрощает разбивку лесосеки на технологические элементы и трелевку заготовленной древесины, *криволинейный* – позволяет машинам объезжать одиночные деревья главных и хозяйственно ценных пород и другие препятствия, а также снижает ветровую нагрузку на насаждение, однако уменьшает расстояние между технологическими стоянками машины по причине необходимости обеспечения доступности и ограничения повреждений деревьев, остающихся на лесосеке [32].

Комбинированный метод рубок ухода подразумевает удаление деревьев любой породы и любого размера, если они заглушают деревья главных пород, а из главных – худшие экземпляры. При проведении этого метода применяют системы машин «харвестер – форвардер» и бензиномоторные пилы. Основной объем заготовки древесины осваивается харвестером, а на труднодоступных участках лесосеки, где харвестер не сможет пройти по тем или иным причинам, деревья дообрабатываются бензиномоторной пилой. Применение комбинированного метода на рубках ухода обеспечивает максимальную продуктивность и большой выход деловой древесины, а благодаря механизированной технике снижаются затраты и повышается производительность труда. Существенным отличием данного метода можно назвать применение бензиномоторных пил в системе с харвестером и форвардером. Это позволяет уменьшить степень повреждения деревьев главных пород, которые оставляют для дорастивания, производя вырубку нежелательных деревьев [33].

Находит применение и *метод заготовки древесной биомассы* [34–36] с применением харвардера Vimek 610 SE BioCombi, который может работать в режиме заготовки тонкомерной древесины на прочистках без обрезки сучьев и транспортировать деревья к местам складирования для последующего измельчения в топливную щепу. Его использование более рационально для расчистки площадей от нежелательной тонкомерной древесно-кустарниковой растительности с целью заготовки топливной биомассы для энергетических целей. Использование комбинированных машин, позволяющих выполнять операции по заготовке и трелевке,

дает возможность повысить производительность. Как правило, этот метод применяется в том случае, где нет деловой древесины [37, 38]. При разработке данного метода также может использоваться харвестер Vimek 404 DUO Bio. Метод работы не отличается от классической системы машин «харвестер – форвардер», за исключением объединения в одной машине полноценного харвестера, способного работать в режиме форвардера, а не наоборот.

Заготовка и вывозка древесины с последующей *переработкой в топливную щепу* также находит применение в Республике Беларусь [39–42]. При проведении ранних прореживаний образуются значительные объемы биомассы в виде тонкомерной древесины. При малом объеме хлыста вся заготовленная древесина может назначаться для переработки в топливную щепу. Метод основывается на том, что после проведения рубок ухода осуществляется разделение заготовленной древесины на деловую и дровяную, где дровяная, в свою очередь, вывозится для дальнейшей переработки на верхний или промежуточный склад. Достоинством данного метода является рациональное использование древесного сырья.

Система машин «харвестер – форвардер» находит применение на всех видах рубок ухода [43, 44]. При классическом их использовании вслед за харвестером движется форвардер, собирающий заготовленные сортименты. Однако существует технология, согласно которой форвардер движется не по каждому следу харвестера, а через один. При этом харвестер укладывает заготовленные сортименты на максимальном вылете манипулятора, ближе к границе пасаки, на которой движение форвардера исключается. Но это условие выполняется только при обеспечении вылета манипулятора как харвестера для возможной укладки, так и форвардера для последующего сбора лесоматериалов. Таким образом, упрощается работа форвардера, так как поддерживаются границы пасаек, но дополнительно к этому повышается изреживание. При использовании данной технологии ориентироваться стоит на форвардер, поскольку преимуществом его является большой радиус поворота вылета манипулятора, высокие показатели грузоподъемности, высокая маневренность. В связи с этим путь форвардера уменьшается примерно вдвое, а то и втрое, при этом сокращается время на заполнение грузовой платформы, благодаря чему повышается производительность машины. При этой технологии не обязательно движение машин друг за другом и не важно, как будет произведена валка, раскряжевка и обрезка сучьев, – ручным инструментом или харвестером. Главное, чтобы заготовленные сортименты были сложены в пачку, а также находились в пределах

видимости и досягаемости манипулятора форвардера по пути его движения. Если брать харвестер, то при заготовке лесоматериалов оператор укладывает их рядом с собой по проходящему пути, где вслед за ним пройдет форвардер. В результате коридоры не прокладываются и остается равномерно прореженный лес. Выбор форвардера влияет на технологический процесс, а также на лесоводственные требования рубок ухода [45, 46].

В связи с большой разновидностью размерно-качественных и биометрических показателей древостоя актуальным является обоснованный выбор технологического оборудования и параметров лесных машин. Прежде всего к главным параметрам можно отнести ширину и вес харвестера и форвардера [47–50], так как минимальная ширина машин избегает повреждения лучших деревьев главных пород. Как показывает практика, для проведения рубок ухода лучше применять малогабаритные машины с вылетом стрелы манипулятора до 6 м. А что касается веса, то немаловажно использование легких машин для предотвращения повреждения корневых систем и почвогрунтов. Однако при прореживании и прочистке учитываются габариты машин, чтобы они могли работать под пологом леса без прокладки коридоров. Для лучшего выхода качественной древесины обе машины должны быть взаимоувязаны и согласованы между собой по техническим и технологическим параметрам. В итоге технология работ на рубках ухода за лесом должна основываться на двух критериях: лесоводственном и экономическом. Лесоводственный критерий позволяет сократить риск повреждения лучших деревьев главных пород, а экономический приводит к сокращению эксплуатационных затрат на рубках.

В настоящее время одним из показателей, характеризующих работу харвестеров Vimek на рубках ухода в лесхозах, является объем заготовленной древесины в месяц, в соответствии с которым осуществляются выплаты заработной платы оператору. Однако учитывая цель рубок ухода, целесообразно в качестве такого показателя использовать не объем заготовленной древесины, а площадь, пройденную рубкой ухода. Это позволит повысить качество рубок ухода, не исключая контроля за работой систем машин.

Заключение. Выполнен анализ методов и способов осуществления рубок ухода за лесом, который показал, что в Республике Беларусь находят применение как системы машин на базе харвестера, так и бензиномоторные пилы. При этом одной из важнейших причин внедрения многооперационных лесозаготовительных машин является недостаток рабочей

силы для своевременного комплексного выполнения рубок ухода.

Сравнительный анализ использования систем машин на базе бензиномоторных пил и харвестеров показал, что применение машинных комплексов обеспечивает проведение качественных рубок в соответствии с СТБ 1361-2002, при этом повышается безопасность труда, улучшаются условия труда, сокращаются сроки рубок, возрастает оперативность организации лесопользования, лесохозяйственных работ.

На основании изучения различных методов проведения рубок ухода за лесом системой машин «харвестер – форвардер» предложены следующие из них для применения в условиях Республики Беларусь:

- с прямолинейной прокладкой технологических коридоров и разбивкой на пасеки;
- с прокладкой криволинейных технологических коридоров;
- без прокладки технологических коридоров, с наметкой траектории движения харвестера и форвардера под пологом леса;
- комбинированный метод с применением в комплексе систем машин «харвестер – форвардер» и бензиномоторных пил;
- заготовка древесной биомассы с использованием харвардера Vimek 610 SE BioCombi;

– классический метод с прокладкой или без прокладки технологических коридоров с применением харвестера Vimek 404 DUO Bio.

Установлены системы машин, рекомендуемые для проведения вышеперечисленных методов. На проходных рубках, реже на прореживаниях, могут применяться машины Ponsse Fox, МЛХ-46, «Амкодор 2531», «Амкодор 2541». На прореживании с прокладкой технологических коридоров в большей степени применяются машины на базе МЛХ-46, «Амкодор 2531» и реже Vimek 404 SE. Без прокладки технологических коридоров на прореживаниях и проходных рубках могут использоваться машины фирмы Vimek, на прочистках и прореживании – Usewood, Logbullet.

На основании исследований можно осуществлять обоснованный выбор систем машин под соответствующие методы и приемы проведения рубок ухода, что позволит обеспечить соответствие лесоводственным требованиям, а также требованиям стандарта СТБ 1361-2002 и др.

После проведения анализа производств рубок ухода в лесхозах в качестве рекомендаций предложено использовать для оценки нормирования труда и заработной платы вместо нормативного показателя объема рубок показатель площади, пройденной рубками.

Список литературы

1. Стратегический план развития лесного хозяйства Беларуси на период до 2030 года: утв. заместителем Премьер-министра Респ. Беларусь 23.12.2014, № 06/201-271. Минск: Совет Министров Респ. Беларусь, 2015. 15 с.
2. О государственной программе «Белорусский лес» на 2021–2025 годы: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 28 янв. 2021 г., № 52 // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100052> (дата обращения: 20.09.2022).
3. Вавилов А. В. Механизация подготовительных работ при лесовосстановлении. Минск: Ураджай, 1985. 47 с.
4. Давыдов А. В. Рубки ухода за лесом. М.: Лесная пром-сть, 1971. 184 с.
5. Багинский В. Ф., Есимчик Л. Д. Лесопользование в Беларуси. Минск: Беларуская навука, 1996. 367 с.
6. Устойчивое лесопользование и лесопользование. Рубки промежуточного пользования. Требования к технологиям: СТБ 1361-2002. Минск: Госстандарт, 2003. 20 с.
7. Лесной кодекс Республики Беларусь // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=Hk1500332> (дата обращения: 14.10.2022).
8. Чибисов, Г. А., Нефедова А. И. Экологическая эффективность рубок ухода за лесом // Лесной журн. 2003. № 5. С. 11–16.
9. Коцан В. В. Классификация деревьев на основании пространственной структуры при назначении в рубки ухода // Труды БГТУ. 2015. № 1: Лесное хоз-во. С. 24–27.
10. Рожков Л. Н. Современные тенденции управления лесами Беларуси // Устойчивое лесопользование. 2016. № 3. С. 16–23.
11. Юшкевич М. В. Влияние рубок ухода на компоненты насаждения // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2003. Вып. XI. С. 103–105.
12. Заготовка и переработка древесных лесных ресурсов // М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь. URL: <https://mlh.by/our-main-activites/forest/zagotovka-i-ispolzovanie-drevesnykh-lesnykh-resursov> (дата обращения: 14.10.2022).

13. Анучин Н. П. Лесная таксация. М.: Лесная пром-сть, 1982. 552 с.
14. Правила рубок леса в Республике Беларусь: постановление М-ва лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 19 дек. 2016 г., № 8 // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21631584&p1=1> (дата обращения: 14.10.2022).
15. Просужих А. А. Повышение производительности колесных форвардеров обоснованием их параметров и режимов работы: дис. ... канд. техн. наук. Ухта, 2020. 158 л.
16. Полукаров М. В. Оценка резервов эксплуатационных затрат систем машин заготовки древесины «харвестер – форвардер» // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов и конкурса по программе «Умник». Екатеринбург, 2017. С. 23–25.
17. Жуков А. В. Теория лесных машин. Минск: БГТУ, 2001. 640 с.
18. Герц Э. Ф. Сравнительная оценка эффективности технологических схем работы систем машин «харвестер – форвардер» по критериям площади технологических коридоров и производительности // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2012. № 4. С. 63–67.
19. Изотова Е. Н. О факторах повышения эффективности работы на харвестерах и форвардерах // Приоритетные направления развития науки и образования. 2016. № 4-2 (11). С. 67–68.
20. Бурмистрова О. Н., Просужих А. А., Рудов С. Е. Экспериментальные исследования производительности форвардера с учетом его эксплуатационных характеристик, параметров лесосеки и физико-механических свойств почвогрунта // Resources and Technology. 2021. Т. 18. № 1. С. 94–124. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5583.
21. Матвейко А. П., Протас П. А. Технология и машины лесосечных работ. Минск: БГТУ, 2008. 116 с.
22. Матвейко А. П., Федоренчик А. С. Технология и машины лесосечных работ. Минск: Технопринт, 2002. 480 с.
23. Кочегаров В. Г., Бит Ю. А., Меньшиков В. Н. Технология и машины лесосечных работ. М.: Лесная пром-сть, 1990. 392 с.
24. Германович А. О., Леонов Е. А., Мохов С. П. Оборудование лесопромышленных предприятий. Практикум. Минск: БГТУ, 2020. 223 с.
25. Лесной фонд // М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь. URL: <https://mlh.by/our-mainactivities/forestry/forests/> (дата обращения: 14.10.2022).
26. Руководство по организации и проведению рубок в лесах Республики Беларусь / М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь. Минск, 2006. 81 с.
27. Божбов В. Е. Повышение эффективности процесса трелевки путем обоснования рейсовой нагрузки форвардеров. СПб.: С.-Петербург. гос. лесотехн. ун-т им. С. М. Кирова, 2015. 119 с.
28. Игнатенко В. В., Турлай И. В., Федоренчик А. С. Моделирование и оптимизация процессов лесозаготовок. Минск: БГТУ, 2004. 180 с.
29. Кузнецов А. В. Эффективность транспортных операций в сложных природно-производственных условиях // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. 2005. № 6. С. 28–29.
30. Макаренко А. В. Оптимизация размещения сети трелевочных волоков на лесосеке // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 апр. 2017 г. Минск, 2017. С. 233–237.
31. Макаренко А. В. Моделирование и оценка эффективности прокладки трелевочных волоков на лесосеке // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2018. Т. 22, № 6. С. 70–78. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-6-70-78.
32. Макаренко А. В. Программное проектирование трелевочных волоков на лесосеке // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2013. № 1. С. 99–104.
33. Руководство по организации и проведению рубок в лесах Республики Беларусь / Ком. лесного хоз-ва при Совете Министров Респ. Беларусь. Минск, 2003. 87 с.
34. Вавилов А. В. Ресурсосберегающие технические средства для топливообеспечения энергетических установок на биомассе. Минск: Стринко, 2006. 187 с.
35. Вавилов А. В. Технологические аспекты и оборудование для получения энергии из биотоплива // Вестник БНТУ. 2004. № 1. С. 68–73.
36. Леонов Е. А., Клоков Д. В. Технология лесозаготовок и переработки древесины. Минск: БГТУ, 2018. 231 с.
37. Семенов Ю. П. Лесная биоэнергетика. М.: МГУЛ, 2008. 350 с.

38. Федоренчик А. С., Клоков Д. В., Леонов Е. А. Технология и оборудование лесосечных и лесоскладских работ. Минск: БГТУ, 2016. 204 с.
39. Вавилов А. В. Топливо из нетрадиционных энергоресурсов. Минск: СтройМедиаПроект, 2014. 90 с.
40. Малая энергетика на биотопливе / А. В. Вавилов [и др.]. Минск: Технопринт, 2002. 247 с.
41. Вавилов А. В., Пашковский М. Н., Соколовский Ю. В. Современная технология и техника для производства топливной щепы // Лесопромышленник. 2008. № 8. С. 22–23.
42. Вавилов А. В., Пашковский М. Н., Соколовский Ю. В. Разработка лесосек и других облесенных площадей с эффективной заготовкой топливной щепы из образуемых древесных отходов // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2008. Вып. XVI. С. 139–145.
43. Григорьев И. В., Валяжонков В. Д. Современные машины и технологические процессы лесосечных работ. СПб.: Темплан, 2009. 287 с.
44. Инновационные технологии лесосечных работ / И. Р. Шегельман [и др.]. Петрозаводск: Verso, 2016. 134 с.
45. Арико С. Е. Обоснование параметров валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины для рубок промежуточного пользования: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Минск, 2012. 225 л.
46. Федоренчик А. С., Протас П. А., Хотянович А. И. Повышение эффективности эксплуатации системы машин «харвестер – форвардер» // Наука и инновации вузов – производству: взаимодействие, эффективность, перспективы: сб. ст. и тез. науч.-практ. семинара, Минск, 22–23 мая 2007 г. Минск, 2008. С. 78–80.
47. Обоснование параметров технологического оборудования харвестера 4К4 для рубок ухода / С. П. Мохов [и др.] // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2008. Вып. XVI. С. 43–46.
48. Игнатенко В. В., Леонов Е. А. Установление рациональных параметров многооперационных машин в лесозаготовительной промышленности // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 5-4. С. 291–295.
49. Анализ тенденций развития конструкций многооперационных лесозаготовительных машин / С. П. Мохов [и др.] // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 18–20.
50. Матвейко А. П. Технология и оборудование лесозаготовительного производства. Минск: Техноперспектива, 2006. 444 с.

References

1. *Strategicheskiy plan razvitiya lesnogo khozyaystva Belarusi na period do 2030 goda* [Strategic plan for the development of the forestry industry for the period to 2030]. Minsk, Sovet Ministrov Respubliki Belarus' Publ., 2015. 20 p. (In Russian).
2. State program “Belarusian Forest” for 2021–2025: approved Decree of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, 28.01.2022, no. 52. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100052> (accessed 20.09.2022) (In Russian).
3. Vavilov A. V. *Mekhanizatsiya podgotovitel'nykh rabot pri lesovosstanovlenii* [Mechanization of preparatory work during reforestation]. Minsk, Uradzhay Publ., 1985. 47 p. (In Russian).
4. Davydov A. V. *Rubki ukhoda za lesom* [Forest thinning]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1971. 184 p. (In Russian).
5. Baginskiy V. F., Esimchik L. D. *Lesopol'zovaniye v Belarusi* [Forest management in Belarus]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 1996. 367 p. (In Russian).
6. STB 1361-2002. Sustainable forest management and forest exploitation. Intermediate fellings. Cabins of the main use. Technology requirements. Minsk, Gosstandart Publ., 2003. 20 p. (In Russian).
7. Forest Code of the Republic of Belarus. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=Hk1500332> (accessed 14.10.2022) (In Russian).
8. Chibisov G. A., Nefedova A. I. Ecological efficiency of logging of forest care. *Lesnoy zhurnal* [Forest journal], 2003, no. 5, pp. 11–16 (In Russian).
9. 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).
10. Rozhkov L. N. Current trends in forest management in Belarus. *Ustoychivoye lesopol'zovaniye* [Sustainable forest management], 2016, no. 3, pp. 16–23 (In Russian).
11. Yushkevich M. V. The effect of logging care on the components of planting. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series I, Forestry, 2003, issue XI, pp. 103–105 (In Russian).

12. Harvesting and processing of wood forest resources. Available at: <https://mlh.by/our-main-activities/forest/zagotovka-i-ispolzovanie-drevesnykh-lesnykh-resursov> (accessed 14.10.2022) (In Russian).
13. Anuchin N. P. *Lesnaya taksatsiya* [Forest Taxation]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 552 p. (In Russian).
14. Rules of logging in the Republic of Belarus: Resolution of the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus, 19.12.2016, no. 8. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21631584&p1=1> (accessed 14.10.2022) (In Russian).
15. Prosuzhikh A. A. *Povysheniye proizvoditel'nosti kolesnykh forvarderov obosnovaniyem ikh parametrov i rezhimov raboty. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Improving the performance of wheel forwarders by justifying their parameters and operating modes. Dissertation PhD (Engineering)]. Ukhta, 2020. 158 p. (In Russian).
16. Polukarov M. V. Estimation of operating cost reserves of harvester – forwarder wood harvesting machine systems. *Nauchnoye tvorchestvo molodezhi – lesnomu kompleksu Rossii: materialy XIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov i konkursa po programme “Umnik”* [Scientific creativity of youth – to the forest complex of Russia: materials of XIII All-Russian scientific and technical conference of students and postgraduates and the competition under the program “Umnik”]. Ekaterinburg, 2017, pp. 23–25 (In Russian).
17. Zhukov A. V. *Teoriya lesnykh mashin* [The theory of forest machines]. Minsk, BGTU Publ., 2001. 640 p. (In Russian).
18. Gerts E. F. Comparative evaluation of the efficiency of technological schemes of the harvester-forwarder machine systems according to the criteria of the area of technological corridors and productivity. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Bulletin of the Moscow State University of the Forest – Forestry Bulletin], 2012, no. 4, pp. 63–67 (In Russian).
19. Izotova E. N. About the factors of increasing the efficiency of work on harvesters and forwarders. *Prioritetnyye napravleniya razvitiya nauki i obrazovaniya* [Priority directions of development of science and education], 2016, no. 4-2 (11), pp. 67–68 (In Russian).
20. Burmistrova O. N., Prosuzhikh A. A., Rudov S. E. Experimental studies of forwarder performance taking into account its operational characteristics, cutting area parameters, and physical and mechanical properties of the soil. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 94–124. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5583 (In Russian).
21. Matveyko A. P., Protas P. A. *Tekhnologiya i mashiny lesosechnykh rabot* [Technology and machines of logging operations]. Minsk, BGTU Publ., 2008. 116 p. (In Russian).
22. Matveiko A. P., Fedorenchik A. S. *Tekhnologiya i mashiny lesosechnykh rabot* [Technology and machines of logging operations]. Minsk, Technoprint Publ., 2002. 480 p. (In Russian).
23. Kochegarov V. G., Bit Yu. A., Men'shikov V. N. *Tekhnologiya i mashiny lesosechnykh rabot* [Technology and machines logging operation]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 392 p. (In Russian).
24. Hermanovich A. O., Leonov E. A., Mokhov S. P. *Oborudovaniye lesopromyshlennykh predpriyatiy. Praktikum* [Equipment for timber industry enterprises. Practicum]. Minsk, BGTU Publ., 2020. 223 p. (In Russian).
25. Forest Fund. Available at: <https://mlh.by/our-main-activities/forestry/forests/> (accessed 14.10.2022) (In Russian).
26. *Rukovodstvo po organizatsii i provedeniyu rubok v lesakh Respubliki Belarus'* [Guidelines for organizing and conducting cuttings in the forests of the Republic of Belarus]. Minsk, 2006. 81 p. (In Russian).
27. Bozhbov V. E. *Povysheniye effektivnosti protsessa trelevki putem obosnovaniya reysovoy nagruzki forvarderov* [Improving the efficiency of the skidding process by justifying the flight load of forwarders]. St. Petersburg, S. M. Kirov St. Petersburg State Forest Technical University Publ., 2015. 119 p. (In Russian).
28. Ignatenko V. V., Turlay I. V., Fedorenchik A. S. *Modelirovaniye i optimizatsiya protsessov lesozagotovok* [Modeling and optimization of logging processes]. Minsk, BGTU Publ., 2004. 180 p. (In Russian).
29. Kuznetsov A. V. Efficiency of transport operations in difficult natural and industrial conditions. *Trudy lesoinzhenerenogo fakul'teta PetrGU* [Proceedings of the Forest Engineering Faculty of PetrSU], 2005, no. 6, pp. 28–29 (In Russian).
30. Makarenko A. V. Optimization of the placement of a network of skidding hauls in the cutting area. *Lesozagotovitel'noye proizvodstvo: problemy i resheniya: materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Logging production: problems and solution: materials of the International scientific and practical conference]. Minsk, 2017, pp. 233–237 (In Russian).

31. Makarenko A. V. Modeling and evaluation of the efficiency of laying skidding lines in the cutting area. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2018, vol. 22, no. 6, pp. 70–78. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-6-70-78 (In Russian).
32. Makarenko A. V. Software design of skidding drags in the cutting area. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Bulletin of the Moscow State University of the Forest – Forestry Bulletin], 2013, no. 1, pp. 99–104 (In Russian).
33. *Rukovodstvo po organizatsii i provedeniiu rubok v lesakh Respubliki Belarus'* [Guidelines for organizing and conducting cuttings in the forests of the Republic of Belarus]. Minsk, 2003. 87 p. (In Russian).
34. Vavilov A. V. *Resursosberegayushchiye tekhnicheskiye sredstva dlya toplivoobespecheniya energeticheskikh ustanovok na biomasse* [Resource-saving technical means for fuel supply of biomass power plants]. Minsk, Strinko Publ., 2006. 187 p. (In Russian).
35. Vavilov A. V. Technological aspects and equipment for obtaining energy from bio-fuel. *Vestnik BNTU* [Bulletin of BNTU], 2004, no. 1, pp. 68–73 (In Russian).
36. Leonov E. A., Klokov D. V. *Tekhnologiya lesozagotovok i pererabotki drevesiny* [Logging and wood processing technology]. Minsk, BGTU Publ., 2018. 231 p. (In Russian).
37. Semenov Yu. P. *Lesnaya bioenergetika* [Forest bioenergetics]. Moscow, MGUL Publ., 2008. 350 p. (In Russian).
38. Fedorenchik A. S., Klokov D. V., Leonov E. A. *Tekhnologiya i oborudovaniye lesosechnykh i lesoskladskikh rabot* [Technology and equipment cutting and timber storage works]. Minsk, BGTU Publ., 2016. 204 p. (In Russian).
39. Vavilov A. V. *Toplivo iz netraditsionnykh energoresursov* [Fuel from non-traditional energy resources]. Minsk, StroyMediaProekt Publ., 2014. 90 p. (In Russian).
40. Vavilov A. V., Zhikhar G. I., Padalko L. P., Arsenov V. V., Garosr M. M. *Malaya energetika na biotoplive* [Small-scale power engineering based on biofuel]. Minsk, Technoprint Publ., 2002. 247 p. (In Russian).
41. Vavilov A. V., Pashkovsky M. N., Sokolovskiy Yu. V. Modern technology and equipment for the production of fuel chips. *Lesopromyshlennik* [Lumberjack], 2008, no. 8, pp. 22–23 (In Russian).
42. Vavilov A. V., Pashkovsky M. N., Sokolovskiy Yu. V. Development of cutting areas and other forested areas with efficient preparation of fuel chips from generated wood waste. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2008, issue XVI, pp. 139–145 (In Russian).
43. Grigor'ev I. V., Valyazhonkov V. D. *Sovremennyye mashiny i tekhnologicheskiye protsessy lesosechnykh rabot* [Modern machines and technological processes logging activities]. St. Petersburg, Templan Publ., 2009. 287 p. (In Russian).
44. Shegel'man I. R., Laurila Ya. T., Skrypnik V. I., Galaktionov O. N. *Innovatsionnyye tekhnologii lesosechnykh rabot* [Innovative logging technology]. Petrozavodsk, Verso Publ., 2016. 134 p. (In Russian).
45. Ariko S. Ye. *Obosnovaniye parametrov valочно-suchkorezno-raskryazhevochnoy mashiny dlya rubok promezhutochnogo pol'zovaniya. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Substantiation of felling-delimiting-bucking machine characteristics for intermediate forest exploitation cutting. Dissertation PhD (Engineering)]. Minsk, 2012. 225 p. (In Russian).
46. Fedorenchik A. S., Protas P. A., Khotyanovich A. I. Improving the operational efficiency of the harvester – forwarder machine system. *Nauka i innovatsii vuzov – proizvodstvu: vzaimodeystviye, effektivnost', perspektivy: sbornik statey i tezisov nauchno-prakticheskogo seminara* [Science and innovation of universities – production: interaction, efficiency, prospects: a collection of articles and abstracts of a scientific and practical seminar]. Minsk, 2008, pp. 78–80 (In Russian).
47. Mokhov S. P., Khainovskii V. V., Asmolovskiy M. K., Korobkin V. A. Justification of the parameters of the technological equipment of the harvester 4K4 for logging. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2008, issue XVI, pp. 43–46 (In Russian).
48. Ignatenko V. V., Leonov E. A. Establishment of rational parameters of multi-operation machines in the timber industry. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2015, vol. 3, no. 5-4, pp. 291–295 (In Russian).
49. Mokhov S. P., Golyakevich S. A., Pishchov S. N., Ariko S. Ye. Analysis of trends in the development of multioperational forest machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 18–20 (In Russian).
50. Matveyko A. P. *Tekhnologiya i oborudovaniye lesozagotovitel'nogo proizvodstva* [Technology and equipment of timber production]. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ., 2006. 444 p. (In Russian).

Информация об авторах

Духовник Алеся Александровна – аспирант. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: alesya.duhovnik@mail.ru

Мохов Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lmitlz@belstu.by

Information about the authors

Dukhovnik Alesya Aleksandrovna – PhD student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alesya.duhovnik@mail.ru

Mokhov Sergey Petrovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lmitlz@belstu.by

Поступила 14.10.2022

УДК 621.3.027.542.3

Ю. А. Ким¹, М. Т. Насковец², Б. В. Войтеховский², Д. Д. Сивицкая¹¹Белорусский национальный технический университет²Белорусский государственный технологический университет**О ПОВЫШЕНИИ ПРОХОДИМОСТИ ВНЕДОРОЖНОГО КОЛЕСНОГО
ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

Проблема повышения проходимости внедорожных транспортных средств и сельскохозяйственных машин не теряет своей актуальности в настоящее время. Более того увеличение производительности и энергонасыщенности лесных и сельскохозяйственных машин приводит к увеличению их массы, а следовательно, обостряет проблему. Причем вопрос повышения проходимости лесных машин решается как за счет упрочнения дорожного покрытия (увеличение числа слоев дорожного покрытия, внедрение подстилающих материалов и др.), так и путем совершенствования движителей.

В статье рассмотрены наиболее приемлемые, эффективные и относительно легкодоступные пути повышения проходимости транспортных средств, оснащенных крупногабаритными шинами. К числу наиболее часто используемых решений проблемы повышения проходимости и энергосберегающих качеств колесных транспортных средств является сдваивание колес, что приводит к ухудшению оборачиваемости машины, либо использование крупногабаритных арочных шин и пневмокотков, что удорожает конструкцию. Наиболее эффективным способом повышения проходимости является регулирование давления воздуха в шинах в зависимости от условий эксплуатации.

Приводятся результаты экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния почво-грунтового массива при различных значениях нагрузки на колесо, свойств опорной поверхности и величин давления воздуха в шине. Разработаны конкретные рекомендации относительно оптимальных значений давления воздуха в шинах колес в зависимости от условий эксплуатации, что в общем случае позволяет уменьшить глубину колеи в среднем на 15–20% в зависимости от механических свойств грунта.

Ключевые слова: проходимость, накачка шин, давление воздуха, уплотнение соединений, герметичность, затраты энергии.

Для цитирования: Ким Ю. А., Насковец М. Т., Войтеховский Б. В., Сивицкая Д. Д. О повышении проходимости внедорожного колесного транспортного средства // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 98–103. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-10.

Yu. A. Kim¹, M. T. Naskovets², B. V. Voitekhovsky², D. D. Sivitskaya¹¹Belarusian National Technical University²Belarusian State Technological University**ABOUT INCREASING THE PERFORMANCE OF OFF-ROAD WHEELS VEHICLE**

The problem of cross-country ability of off-road vehicles and agricultural machines does not require its relevance at the present time. Moreover, an increase in the productivity and energy saturation of forestry and agricultural production machines leads to an increase in their mass, and, consequently, exacerbates the problem. Thus, the issue of taking into account the passability of forest machine materials is solved both by strengthening the road surface (increasing the number of layers of the road surface, the need for underlying ones, etc.), and by improving the movers.

The article discusses the most acceptable, effective and relatively easily accessible ways to increase the cross-country ability of vehicles equipped with oversized tires. Among the most commonly used solutions to the problem of increasing the cross-country ability and energy-saving qualities of wheeled vehicles is doubling the wheels, which leads to a deterioration in the turnover of the vehicle. Or the use of large-sized arched tires and pneumatic rollers, which increases the cost of the structure. The most effective way to increase flotation is to adjust the air pressure in the tires depending on the operating conditions.

The results of experimental studies of the stress-strain state of the soil massif are given for various values of the load on the wheel, the properties of the supporting surface and the values of air pressure in the tire. Specific recommendations have been developed regarding the optimal values of air pressure in

the tires of the wheels, depending on the operating conditions, which in the general case allows to reduce the concentration of the track by an average of 15–20%, depending on the mechanical properties of the soil.

Keywords: patency, tire inflation, air pressure, joint sealing, tightness, energy costs.

For citation: Kim Yu. A., Naskovets M. T., Voitekhovsky B. V., Sivitskaya D. D. About increasing the performance of off-road wheels vehicle. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 98–103. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-10 (In Russian).

Введение. Одним из основных параметров колесного движителя является величина и характер распределения напряжений [1–4]. Этот параметр влияет на глубину погружения колеса, степень уплотнения почвы, сопротивление качению и другие показатели. Однотипность грунтовых условий позволяет произвести качественную и количественную оценку величин напряжений под движителями в зависимости от давления воздуха в шине и вертикальной нагрузки на колесо.

Целью данного исследования является определение предпочтительных величин давления воздуха в крупногабаритных шинах, используемых на внедорожных транспортных средствах.

Основная часть. Исследования проводились с использованием крупногабаритной шины низкого давления Ф-82. Наиболее наглядное представление о характере и величинах распределения напряжений по глубине почвенного массива дают изолинии напряжений [5] в продольной и поперечной плоскостях симметрии колеса (рис. 1). Величина напряжения z указана на каждой из линий равного напряжения (рис. 1, а и б). Изолинии построены на основании эпюр контактных напряжений P_{zz} (рис. 1, в и г), полученных на различной глубине почвенного массива по показаниям мессдоз, внедренных в почву на пашне ($W = 15–20\%$).

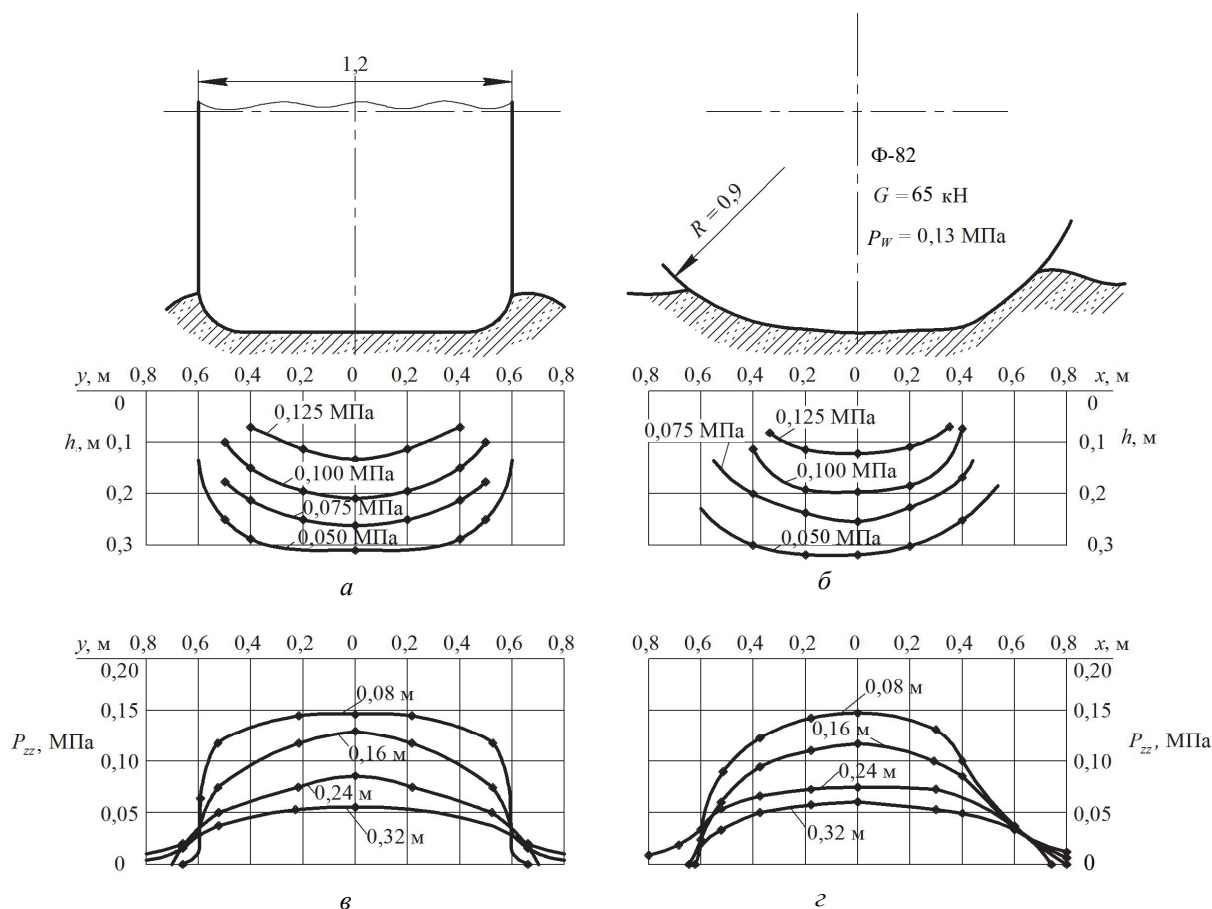


Рис. 1. Распределение напряжений под задним колесом с шиной Ф-82 ($G = 65$ кН, $P_w = 0,13$ МПа): а – линии равного напряжения величины z в поперечной плоскости симметрии; б – линии равного напряжения величины z в продольной плоскости симметрии, в – изолинии контактных напряжений P_{zz} в поперечной плоскости симметрии; г – изолинии контактных напряжений P_{zz} в продольной плоскости симметрии

Характер распределения напряжений следует считать благоприятным. Изолинии в продольной и поперечной плоскостях колеса имеют участок (0,6–0,8 м), близкий к горизонтальному, без высоких концентраций напряжений, очертание эпюр плавное. Изменение напряжений по глубине почвенного массива неодинаково в различных поясах шины. Под осью колеса, в середине беговой дорожки шины, напряжения плавно уменьшаются с возрастанием глубины (по мере удаления от оси колеса), а также ближе к краю беговой дорожки шины. Напряжения в верхних слоях уменьшаются интенсивнее, чем в нижних. Это объясняется конусообразным распространением напряжений в почве и особенно ярко выражено в поперечной плоскости, где действуют только вертикальные внешние усилия. В продольной же плоскости возникают касательные усилия, делающие картину не симметричной. Эпюры и изолинии напряжений представлены в поперечной плоскости, симметричной относительно оси O_z .

В продольной плоскости симметрии колеса форма эпюр P_{zz} несимметрична относительно оси O_z . Напряжения на нагрузочном участке, деформирующем почву, возрастают плавно и имеют максимум при внутришинном давлении $P_W = 0,13$ МПа под осью колеса. На более коротком разгрузочном участке напряжения резко падают. Площадь эпюры нагрузочного участка больше разгрузочного. Центр тяжести всей эпюры смещен вперед на некоторую величину. Таким образом, произведение суммы вертикальных составляющих напряжений в точке контакта на величину смещения будет давать момент сопротивления качению колеса за счет деформации почвы. Эпюра сжимающего напряжения имеет описанный характер не только в верхних слоях, но и на глубине до 0,25 м. И лишь на глубине 0,30 м эпюра до некоторой степени выравнивается. Благодаря тому, что движители оказывают низкое давление на опорную поверхность, при форме пятна контакта, близкой к прямоугольной со скругленными углами, напряжения в почве имеют невысокие значения. Плотность почвы в следе в зависимости от нагрузки G и давления воздуха в шинах P_W составляет $\rho = 1,15 \cdot 10^3 - 1,37 \cdot 10^3$ кг/м³, при начальной $\rho = 1,03 \cdot 10^3$ кг/м³. Коэффициент податливости оболочки шины модели Ф-82 имеет значение, равное 10 см³/кг. Введение коэффициента C позволяет оценить влияние соседних участков шины на деформативные свойства данного участка. Определение радиальной жесткости шины на стенде по ее прогибу в зависимости от

нагрузки дает лишь общую картину или конечный результат. Что касается величин контактных напряжений P_{zz} , то во всем диапазоне нагрузок на колесо изменение давления воздуха в шинах P_W приводит к изменению величин и характера контактного напряжения. Снижение P_W приводит к уменьшению контактного напряжения и одновременно изменяет характер его распределения. В поперечной плоскости величина контактного напряжения уменьшается к середине беговой дорожки и относительно возрастает по краям. Однако чрезмерное снижение P_W нежелательно, так как деформация шины может превысить допустимую величину. Так, например, при $P_W = 0,07$ МПа и $G = 65$ кН на боковинах шины образуются складки, что вызывает повышенный износ и резко увеличивает гистерезисные потери энергии при качении. На величину контактного напряжения оказывают влияние состояния опорной поверхности. На рыхлом торфянике ($W = 65-70\%$) увеличение P_W свыше 0,11; 0,12; 0,15 МПа при нагрузке, соответственно равной 35, 50, 65 кН, не вызывает увеличения контактного напряжения, так как форма и размеры пневматической шины практически не изменяются. Т. е. пневматическое колесо ведет себя как жесткое. На пашне ($W = 15-20\%$) аналогичная картина представляется при увеличении P_W свыше 0,12; 0,135; 0,16 МПа при тех же значениях нагрузки на колесо. На многолетних травах на торфянике ($W = 50-53\%$) – соответственно 0,13; 0,15; 0,18 МПа. Однако если в первых двух случаях величины контактных напряжений равны в одних и тех же поясах шины под почвозацепами и между ними, то здесь наблюдается существенное отличие.

Почвозацепы высотой 0,05 м, которыми снабжена шина Ф-82, концентрируют напряжения в контакте. Так, при движении по многолетним травам на торфянике при погружении колеса на глубину 0,08 м величина давления под почвозацепами на 20% выше, чем вне их. Уменьшение высоты почвозацепов позволит выровнять эпюру давлений, однако могут снизиться тяговые качества. Существует мнение, что высота зацепов и другие параметры рисунка протектора практически не влияют на реализацию движителем тягового усилия. Это обосновывается тем, что протектор забивается и колесо работает, как гладкое. Полностью с этим согласиться нельзя, поскольку меры, принимаемые для самоочищаемости протектора, позволяют включить почвозацепы в работу. В. Ф. Бабков, В. С. Гапоненко, Н. Ф. Бочаров

[6–8], В. А. Соколова [9] указывают, что высокие и редко расположенные зацепы протектора твердого подстилающего основания, пронзая верхние слабые слои, обеспечивают достаточное сцепление. Однако при чрезмерном увеличении высоты зацепов появляется вероятность их неполного заглубления в почву, при этом будет отсутствовать давление под опорными поверхностями впадин, что повлечет за собой уменьшение силы тяги. Кроме того, при этом повышается радиальная жесткость шины [10–12]. Таким образом, комплекс требований, предъявляемых к шинам высокой проходимости, обширен и порой противоречив. Так, например, требование снижения уплотняющего воздействия почвы часто противоречит требованию повышения сцепных качеств. Поэтому при выборе высоты почвозацепов необходимо компромиссное решение. На основании экспериментально-теоретических исследований качеств шин высокой проходимости [13–15] рекомендуют высоту зацепов не более 0,03 м.

Как показывают результаты проведенных исследований, величина контактного напряжения в меньшей степени зависит от нагрузки на колесо G , а в большей – от внутреннего давления в шине P_W и свойств опорной поверхности. Глубина оставляемой колесом колеи изменяется в зависимости от P_W и G на всех исследуемых опорных поверхностях. На рис. 2–4 представлены зависимости глубины колеи h от P_W на различных типах опорных поверхностей. При движении машины по рыхлому торфянику ($W = 65–70\%$, $G = 65$ кН и $P_W = 0,1$ МПа) образуется колея глубиной 0,15–0,17 м, в то время как увеличение P_W до 0,13 МПа вызывает потерю проходимости при проезде по следу.

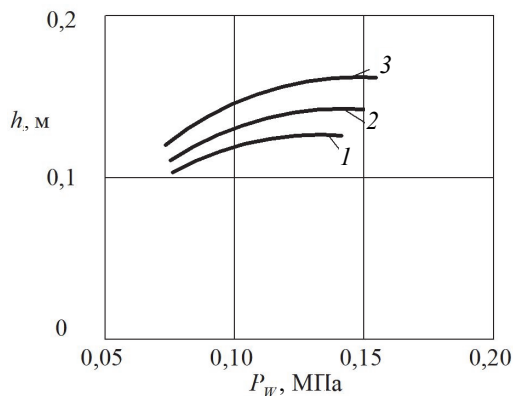


Рис. 2. Зависимость глубины колеи h от внутреннего давления в шине P_W на рыхлом торфянике ($W = 65–70\%$):

1, 2, 3 – $G = 34, 50, 65$ кН соответственно

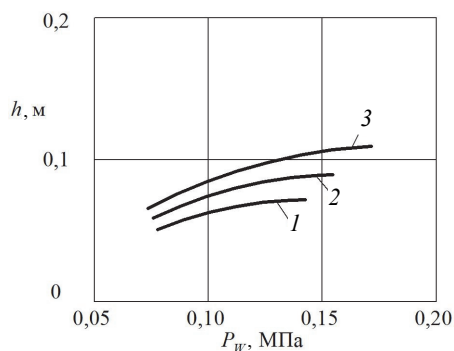


Рис. 3. Зависимость глубины колеи h от внутреннего давления в шине P_W на пахоте ($W = 15–20\%$):

1, 2, 3 – $G = 34, 50, 65$ кН соответственно

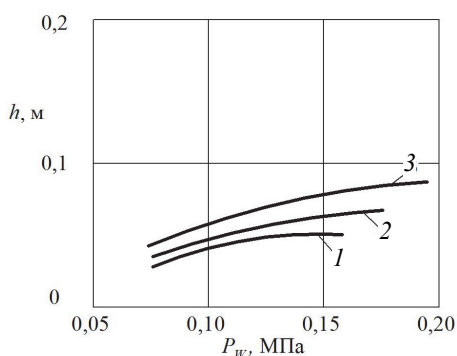


Рис. 4. Зависимость глубины колеи h от внутреннего давления в шине P_W на многолетних травах на торфянике ($W = 50–53\%$):

1, 2, 3 – $G = 34, 50, 65$ кН соответственно

Заключение. Таким образом, в результате проведенных исследований можно сделать вывод о том, что одним из наиболее эффективных и одновременно доступных путей повышения проходимости внедорожных транспортных средств является регулирование давления воздуха в шинах колесных движителей. Так, например ограничение величины нагрузки на колесо может привести к резкому снижению производительности машины, а внесение изменений в конструкцию шины – к значительным затратам. Регулирование величины давления воздуха в шинах должно осуществляться в указанных заводом-изготовителем пределах с применением специальных средств, позволяющих производить регулировку на ходу, в зависимости от условий эксплуатации. Подбор оптимальных значений давления воздуха в шинах колес транспортного средства позволяет уменьшить глубину колеи и снизить энергозатраты на передвижение.

Оснащение транспортных средств специальными системами центральной подкачки шин на ходу позволит существенно и с минимальными затратами повысить их эксплуатационные качества.

Список литературы

1. Бабков В. Ф. Напряжения в грунтовых основаниях дорожных одежд // Труды ДорНИИ. 1941. Вып. 3. С. 99–196.
2. Скотников В. А., Смилский В. В., Галкин Е. М. Моделирование сопротивления качению колеса пневматической шиной по деформирующейся почве // Взаимодействие ходовых систем с почвогрунтами. Минск: БИМСХ, 1983. С. 6–8.
3. Орда А. Н. Исследование механики колееобразования и уплотнения почвы колесными движителями и обоснование требований к многоосным ходовым системам: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1978. 16 с.
4. Скойбеда А. Т. Автоматизация ходовых систем колесных машин. Минск: Наука и техника, 1979. 277 с.
5. Костюк Н. П. Исследование напряженно-деформированного состояния осушенной торфяной залежи при воздействии ходовых устройств: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Калинин, 1971. 25 с.
6. Соколова В. А., Петров И. П. Исследование взаимодействия арочного колеса с опорной поверхностью // Труды НАМИ. 1962. Вып. 54. С. 64–72.
7. Гапоненко В. С. О путях снижения уплотняющего воздействия машинно-тракторных агрегатов на почву // Влияние сельскохозяйственной техники на почву: тр. Почвенного института имени В. В. Докучаева. М., 1981. С. 56–61.
8. Бочаров Н. Ф. Транспортные средства на эластичных движителях. М.: Машиностроение, 1974. 208 с.
9. Бобков В. Ф., Бируля А. К., Сиденко В. М. Проходимость колесных машин по грунту. М.: Автотрансиздат, 1959. 181 с.
10. Ким Ю. А., Опейко С. Ф. Теоретическое определение напряжений в области контакта жесткого колеса с деформируемым грунтом // Автотракторостроение. Вып. 17. Теория и конструирование мобильных машин. Минск, 1982. С. 68–70.
11. Колобов Г. К., Полетаев А. Ф. К вопросу взаимодействия тракторной шины с почвой // Тракторы и сельхозмашины. 1960. № 2. С. 9–11.
12. Влияние высоты грунтозацепов протектора на жесткостные характеристики шин ведущих колес тракторов класса 1,4 / Ю. П. Завьялов [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. 1984. № 13. С. 18–19.
13. Бражник Б. М. Исследование влияния рисунка протектора шин с регулируемым давлением на сцепление с грунтом: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1974. 20 с.
14. Хархута Н. Я., Васильев Ю. М. Деформация грунтов дорожных насыпей. М.: Автотрансиздат, 1957. 71 с.
15. Антипов Л. А., Соломатин В. И., Шереметьев Б. М. О шинах и пневмооборудовании дорожных катков // Строительные и дорожные машины. 1983. № 4. С. 10–12.

References

1. Babkov V. F. Stresses in soil foundations of pavements. *Trudy DorNII* [Proceedings of Road Research Institute], 1941, issue 3, pp. 99–196 (In Russian).
2. Skotnikov V. A., Smilskiy V. V., Galkin E. M. *Modelirovaniye soprotivleniya kacheniyu koleasa pnevmaticheskoy shinoy po deformiruyushcheysoya pochve* [Modeling the rolling resistance of wheels with a pneumatic tire on deforming soil]. Minsk, BIMSKh Publ., 1983, pp. 6–8 (In Russian).
3. Orda A. N. *Issledovaniye mekhaniki koleyeobrazovaniya i uplotneniya pochvy kolesnymi dvizhitelyami i obosnovaniye trebovaniy k mnogoosnym khodovym sistemam. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Study of the mechanics of rutting and soil compaction by wheel movers and justification of safety for multi-axle running systems. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Minsk, 1978. 16 p. (In Russian).
4. Skoybeda A. T. *Avtomatizatsiya khodovykh sistem kolesnykh mashin* [Automation of running systems of wheeled vehicles]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1979. 277 p. (In Russian).
5. Kostyuk N. P. *Issledovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya osushennoy torfyanoy zalezhi pri vozdeystvii khodovykh ustroystv. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Investigation of the stress-strain state of a drained peat deposit under the influence of running devices. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Kalinin, 1971. 25 p. (In Russian).
6. Sokolova V. A., Petrov I. P. Investigation of the interaction of an arched wheel with a support surface. *Trudy NAMI* [Proceedings of NAMI], 1962, issue 54, pp. 64–72 (In Russian).
7. Gaponenko V. S. On ways to reduce the compacting effect of machine-tractor units on the soil. *Vliyaniye sel'skokhozyaystvennoy tekhniki na pochvu: trudy Pochvennogo instituta iment V. V. Dokuchaeva*

yeva [The impact of agricultural machinery on the soil: Proceedings of the V. V. Dokuchaev Soil Institute], Moscow, 1981, pp. 56–61 (In Russian).

8. Bocharov N. F. *Transportnyye sredstva na elastichnykh dvizhitelyakh* [Vehicles on elastic propulsion]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1974. 208 p. (In Russian).

9. Bobkov V. F., Birulya A. K., Sidenko V. M. *Prokhozimost' kolesnykh mashin po gruntu* [Passability of wheeled vehicles on the ground]. Moscow, Avtotransizdat Publ., 1959. 181 p. (In Russian).

10. Kim Yu. A., Opeyko S. F. Theoretical determination of stresses in the area of contact of a rigid wheel with deformable soil. *Avtotraktorostroyeniye* [Autotractor building], issue 17, Theory and design of mobile machines, Minsk, 1982, pp. 68–70 (In Russian).

11. Kolobov G. K., Poletaev A. F. On the issue of interaction between a tractor tire and soil. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and agricultural machines], 1960, no. 2, pp. 9–11 (In Russian).

12. Zavyalov Yu. P., Grachev Yu. S., Zavgorodniy V. I., Brazhnik B. M. Influence of the height of the tread lugs on the rigidity characteristics of tires for driving wheels of class 1.4 tractors. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and agricultural machines], 1984, no. 13, pp. 18–19 (In Russian).

13. Brazhnik B. M. *Issledovaniye vliyaniya risunka protektora shin s reguliruyemym davleniyem na stsepleniye s gruntom. Avtoferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Study of the influence of the tread pattern of tires with adjustable pressure on grip with the ground. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Moscow, 1974. 20 p. (In Russian).

14. Kharkhuta N. Ya., Vasiliev Yu. M. *Deformatsiya gruntov dorozhnykh nasypey* [Deformation of road embankment soils]. Moscow, Avtotransizdat Publ., 1957. 71 p. (In Russian).

15. Antipov L. A., Solomatin V. I., Sheremetiev B. M. About tires and pneumatic equipment of road rollers. *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny* [Construction and road machines], 1983, no. 4, pp. 10–12 (In Russian).

Информация об авторах

Ким Юрий Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной графики машиностроительного профиля. Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, ул. Я. Коласа, 12, Республика Беларусь). E-mail: igmp_atf@bntu.by

Насковец Михаил Трофимович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: naskovets@belstu.by

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

Сивицкая Диана Дмитриевна – магистрант кафедры инженерной графики машиностроительного профиля. Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, ул. Я. Коласа, 12, Республика Беларусь). E-mail: igmp_atf@bntu.by

Information about the authors

Kim Yuriy Alekseevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Engineering Graphics for Machine-Building. Belarusian National Technical University (12, Kolasa str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: igmp_atf@bntu.by

Naskovets Mikhail Trofimovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: naskovets@belstu.by

Voitechovsky 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

Sivitskaya Diana Dmitrievna – Master's degree student, the Department of Engineering Graphics for Machine-Building. Belarusian National Technical University (12, Kolasa str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: igmp_atf@bntu.by

Поступила 15.10.2022

УДК 630*37:630*31(476.5)

Е. А. Леонов¹, Д. В. Клоков²¹Белорусский государственный технологический университет²Белорусский национальный технический университет**АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ МАШИН ДЛЯ ЛЕСОЗАГОТОВОК
В ОАО «ВИТЕБСКДРЕВ»**

ОАО «Витебскдрев» является многопрофильным предприятием деревообработки, которое также осуществляет заготовку древесины для собственных нужд. Для этого в лесопункте применяются следующие основные системы машин: Ponsse Ergo + Ponsse Buffalo, Husqvarna-560XP + Ponsse Buffalo и Husqvarna-560XP + МПТ-461.1. Разрабатываемый годовой лесосечный фонд отличается значительным многообразием природно-производственных условий, которые в том или ином ключе оказывают влияние на эффективность применяемых машин, а следовательно, и на себестоимость заготовки 1 м³ древесины.

Цель – выбор и обоснование эффективной системы машин для лесозаготовок в конкретных природно-производственных условиях.

В статье приведена методика расчета производственной себестоимости заготовки древесины, которая позволяет определять наиболее рациональную систему лесозаготовительных машин на стадии планирования лесосечных работ с учетом ряда природно-производственных факторов. Проведенные теоретические исследования на основе производственной статистики ОАО «Витебскдрев» позволили установить рациональные диапазоны применения рассматриваемых систем машин в условиях данного предприятия с учетом таких факторов, как средний объем хлыста и среднее расстояние подвозки древесного сырья. В частности, установлено, что в насаждениях со средним объемом хлыста от 0,20 до 0,25 м³ рассматриваемые системы машин являются сопоставимыми. При разработке более крупных насаждений применение систем машин с использованием бензопил является в среднем в 1,05–1,08 раз эффективнее машинного комплекса. При этом приоритет в использовании нужно отдавать специализированным форвардерам.

Ключевые слова: лесозаготовки, система машин, анализ, эффективность.

Для цитирования: Леонов Е. А., Клоков Д. В. Анализ применения систем машин для лесозаготовок в ОАО «Витебскдрев» // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 104–110. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-11.

E. A. Leonov¹, D. V. Klokov²¹Belarusian State Technological University²Belarusian National Technical University**THE USE ANALYSIS OF MACHINE SYSTEMS FOR LOGGING
AT JSC “VITEBSKDREV”**

JSC “Vitebskdrev” is a diversified woodworking enterprise that also harvests wood for its needs. To do this, the lumber station uses the following main machine systems: “Ponsse Ergo + Ponsse Buffalo”, “Husqvarna-560XP + Ponsse Buffalo” and “Husqvarna-560XP + MPT-461.1”. The developed annual logging fund is distinguished by a significant variety of natural and production conditions, which in one way or another affect the efficiency of the machines used, and, consequently, the cost of harvesting 1 m³ of wood.

The goal is the selection and justification of an effective system of machines for logging in specific natural and production conditions.

The article presents a methodology for calculating the production cost of wood harvesting, which allows you to determine the most rational system of logging machines at the planning stage of logging operations, taking into account a number of natural and production factors. The theoretical studies carried out, taking into account the production statistics of JSC “Vitebskdrev”, made it possible to establish rational ranges for the application of the considered machine systems in the conditions of this enterprise, taking into account such factors as the average volume of the whip and the average distance of the delivery of wood raw materials. In particular, it was found that in plantations with an average volume of a tree-length from 0.20 to 0.25 m³, the considered machine systems are comparable. When developing larger stands, the use of machine systems using chainsaws is on average 1.05–1.08 times more efficient than the machine complex. At the same time, priority in use should be given to specialized forwarders.

Keywords: logging, machine system, analysis, efficiency.

For citation: Leonov E. A., Klokov D. V. The use analysis of machine systems for logging at JSC “Vitebskdrev”. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 104–110. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-11. (In Russian).

Введение. ОАО «Витебскдрев» является многопрофильным деревообрабатывающим предприятием, которое также осуществляет заготовку древесины для собственных нужд. Его структурным подразделением (лесопунктом) эксплуатируются системы машин на базе бензопил и форвардеров, а также машинные комплексы (рис. 1). Отличительной особенностью разрабатываемого годового лесосечного фонда является многообразие природно-производственных условий, которые в той или иной степени влияют на эффективность применяемых систем машин [1–12], а следовательно, и на себестоимость заготовки 1 м³ древесины.

В этой связи выбор и обоснование системы машин, оптимальной для применения в конкретных природно-производственных условиях, являются весьма актуальными задачами, так как направлены на повышение эффективности лесозаготовительного производства за счет обеспечения минимальной себестоимости лесосечных работ, что в конечном итоге ведет к повышению конкурентоспособности продукции лесопилени и деревообработки.

Основная часть. 1. Методика исследований включала определение производственной себестоимости заготовки 1 м³ круглых лесоматериалов с учетом типа применяемой системы

машин и изменяющихся природно-производственных условий. Рассматриваемый параметр, в свою очередь, включал расчет следующих статей затрат: [13]:

- фонда заработной платы основных рабочих с отчислениями;
- эксплуатации и ремонта системы машин;
- древесного сырья;
- общепроизводственных расходов.

С целью сравнительного анализа эффективности применяемого лесосечного оборудования для теоретических исследований были выбраны следующие типы систем машин, традиционно применяемых в природно-производственных условиях лесопункта ОАО «Витебскдрев»:

- Husqvarna-560XP + МПТ-461.1;
- Husqvarna-560XP + Ponsse Bufallo;
- Ponsse Ergo + Ponsse Bufallo.

На основании производственной статистики установлено, что основными параметрами, существенно оказывающими влияние на удельную производственную себестоимость лесозаготовок, являются средний объем хлыста разрабатываемых лесосек ($V_{хл}$) и среднее расстояние трелевки (подвозки) древесины ($S_{ср}$) [13–15].

Наименование параметров и диапазоны их варьирования, применяемые в расчетах, приведены в табл. 1.

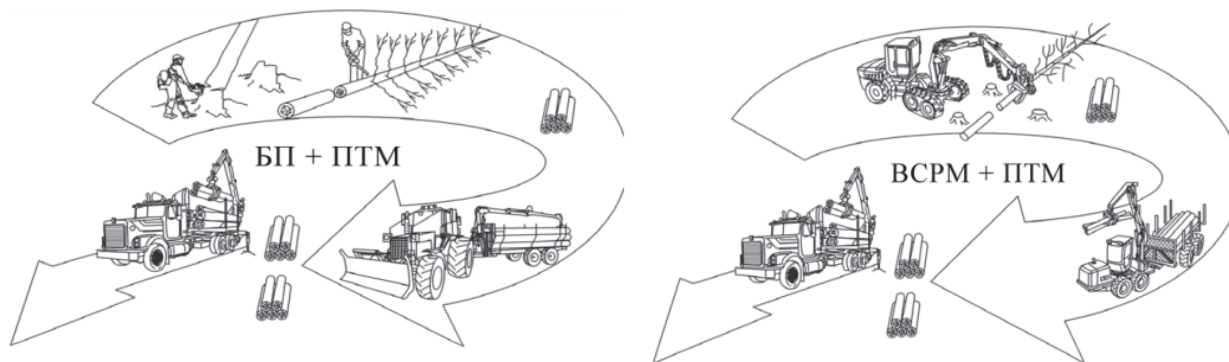


Рис. 1. Основные системы машин для выполнения лесосечных работ, применяемые в условиях ОАО «Витебскдрев»

Таблица 1

Исследуемые параметры и диапазоны их варьирования

Величина	Значение величины		Шаг изменения величины
	минимальное	максимальное	
Средний объем хлыста $V_{хл}$, м ³	0,2	1,0	0,1
Среднее расстояние трелевки (подвозки) $S_{ср}$, м	100	2000	250

2. Результаты исследований. Рассчитанные с учетом производственной статистики ОАО «Витебскдрев» удельные показатели, представлены в табл. 2.

На основании проведенных расчетов установлено, что при освоении расчетной лесосеки со средним объемом хлыста $0,4 \text{ м}^3$ и средним расстоянием подвозки древесины 500–700 м по критерию удельной производственной себестоимости заготовки древесины применение системы машин на базе бензопил в среднем на 4–5% эффективнее машинных комплексов.

Основной статьей затрат на выполнение лесосечных работ является «Эксплуатация и ремонт системы машин», которая при использовании машинного комплекса Ponsse Ergo + Ponsse Buffalo составляет около 62% от общей производственной себестоимости заготовки 1 м^3 древесины. При этом применение систем машин с использованием бензопил Husqvarna-560XP приводит к снижению данного показателя в среднем на 31–57%.

В то же время применение машинного комплекса обеспечивает существенную экономию (в 2,5–2,9 раза) фонда заработной платы основных рабочих с отчислениями, исключает ручной труд и производственный травматизм.

С целью определения степени влияния среднего объема хлыста разрабатываемых насаждений на величину удельной производственной себестоимости лесозаготовок по выбранным системам машин при постоянном среднем расстоянии подвозки древесины нами был проведен ряд теоретических исследований. Результаты отражены на рис. 2.

Представленные на рис. 2, а графические зависимости позволяют утверждать, что при разработке лесосек со средним объемом хлыста

до $0,22 \text{ м}^3$ применяемые в условиях лесопункта ОАО «Витебскдрев» бензопилы Husqvarna-560XP и харвестеры Ponsse Ergo являются сопоставимыми на операциях валки деревьев, очистки их от сучьев и раскряжевки хлыстов на сортименты. С увеличением среднего объема хлыста в разрабатываемых лесосеках с $0,2$ до $1,0 \text{ м}^3$ наблюдается снижение удельной производственной себестоимости выполнения указанных операций на 39 и 30% соответственно при использовании бензопил и харвестеров.

Применение определенного типа форвардера (рис. 2, б) в условиях изменяющегося среднего объема хлыста не является принципиальным, так как максимальная разность удельных затрат между прицепной погрузочно-транспортной машиной МПТ-461.1 и специализированным форвардером Ponsse Buffalo наблюдается в насаждениях со средним объемом хлыста от $0,35$ до $0,5 \text{ м}^3$ и составляет не более 3%.

Рассматривая системы машин в целом (рис. 2, в), отметим, что при постоянном среднем расстоянии подвозки древесины 500–700 м принципиальные отличия в удельной себестоимости лесозаготовок наблюдаются в насаждениях со средним объемом хлыста свыше $0,3 \text{ м}^3$. В этом случае целесообразно применять системы машин на базе бензопил Husqvarna-560XP, которые в настоящее время на 5–8% являются более эффективными по сравнению с машинным комплексом Ponsse Ergo + Ponsse Buffalo.

Результаты теоретических исследований влияния среднего расстояния трелевки (подвозки) древесины на величину удельной производственной себестоимости лесозаготовок при постоянном среднем объеме хлыста разрабатываемых насаждений приведены на рис. 3.

Таблица 2

Сравнительная характеристика статей затрат производственной себестоимости заготовки 1 м^3 круглых лесоматериалов основными системами машин

Статьи затрат	Husqvarna-560XP + МПТ-461.1	Husqvarna-560XP + Ponsse Buffalo	Ponsse Ergo + Ponsse Buffalo
1. Фонд заработной платы основных рабочих с отчислениями, руб/ м^3	6,35	5,47	2,28
2. Эксплуатация и ремонт системы машин, руб/ м^3	11,26	12,09	16,71
в том числе:			
– топливо	3,10	3,71	3,54
– фонд заработной платы вспомогательных рабочих с начислениями	2,95	2,42	1,37
– техническое обслуживание и ремонт	1,82	2,44	5,49
– амортизационные отчисления	3,39	3,52	6,31
3. Древесное сырье, руб/ м^3	7,50	7,50	7,50
4. Общепроизводственные расходы, руб/ м^3	0,87	0,67	0,53
Итого	25,98	25,73	27,02

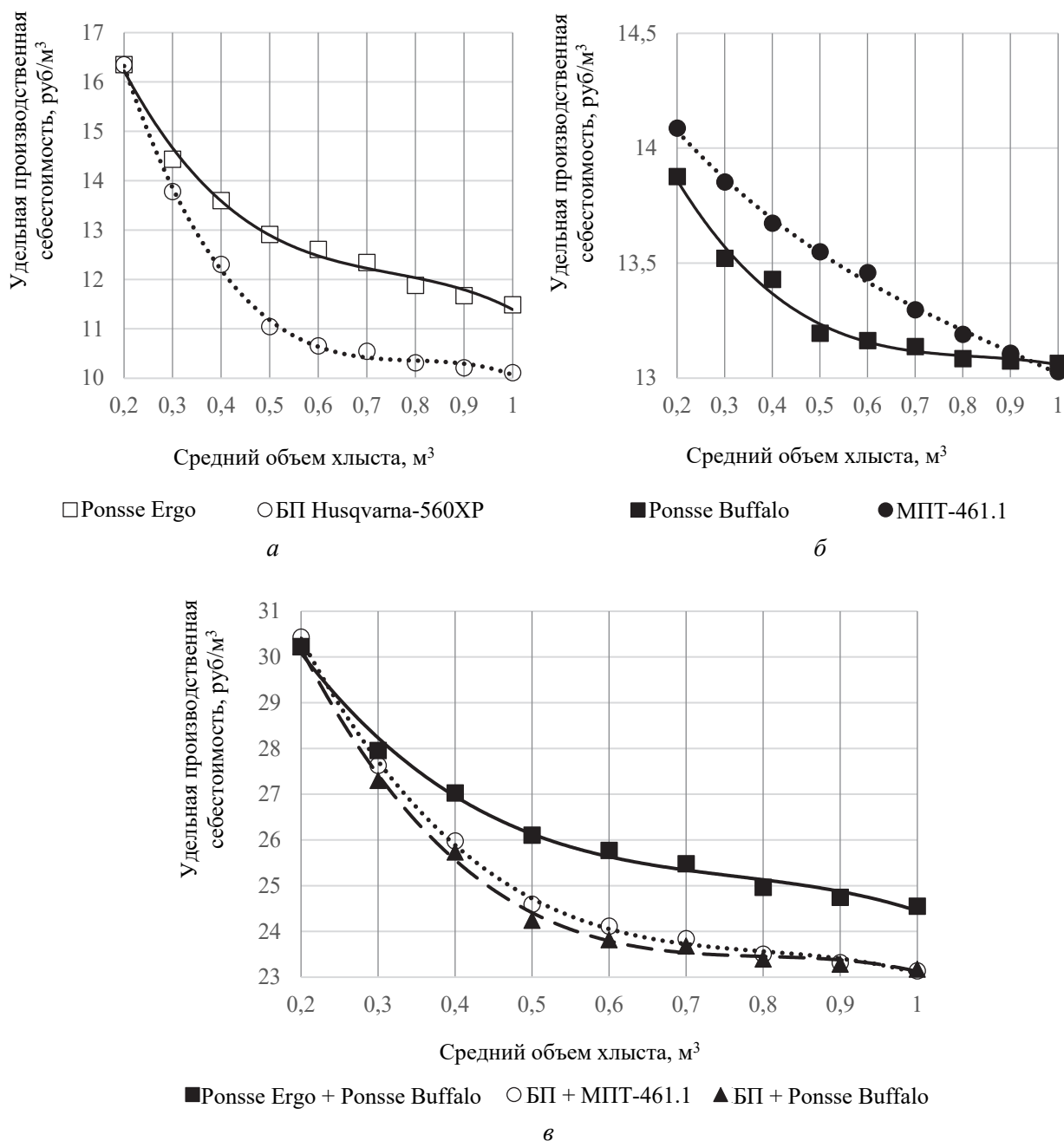


Рис. 2. Динамика изменения производственной себестоимости заготовки 1 м³ древесины от среднего объема хлыста (при среднем расстоянии подвозки сортиментов 500–700 м): а – на операциях валки деревьев, их очистке от сучьев и раскряжевке на сортименты; б – на операции подвозки сортиментов; в – в целом по системе машин

По результатам исследований (рис. 3, а) установлено, что при среднем объеме хлыста, равном 0,5 м³, специализированные форвардеры Ponsse Buffalo наиболее эффективно применять на расстояниях подвозки лесоматериалов до 1300 м.

В этом случае удельная себестоимость данной операции будет в среднем на 5–7% ниже, чем аналогичный показатель при использовании погрузочно-транспортных машин МПТ-461.1. В случае увеличения среднего расстояния подвозки древесины с 1300 до 2000 м приори-

тет в выборе оборудования следует отдавать МПТ-461.1.

Рассматривая системы машин в целом (рис. 3, б), отметим, что при постоянном среднем объеме хлыста разрабатываемых насаждений 0,5 м³ в диапазоне трелевки (подвозке) круглых лесоматериалов от 100 до 2000 м в условиях лесопункта ОАО «Витебскдрев» с точки зрения удельных производственных затрат применение систем машин на базе бензопил оказывается на 7–9% более выгодным по сравнению с машинным комплексом Ponsse Ergo + Ponsse Buffalo.

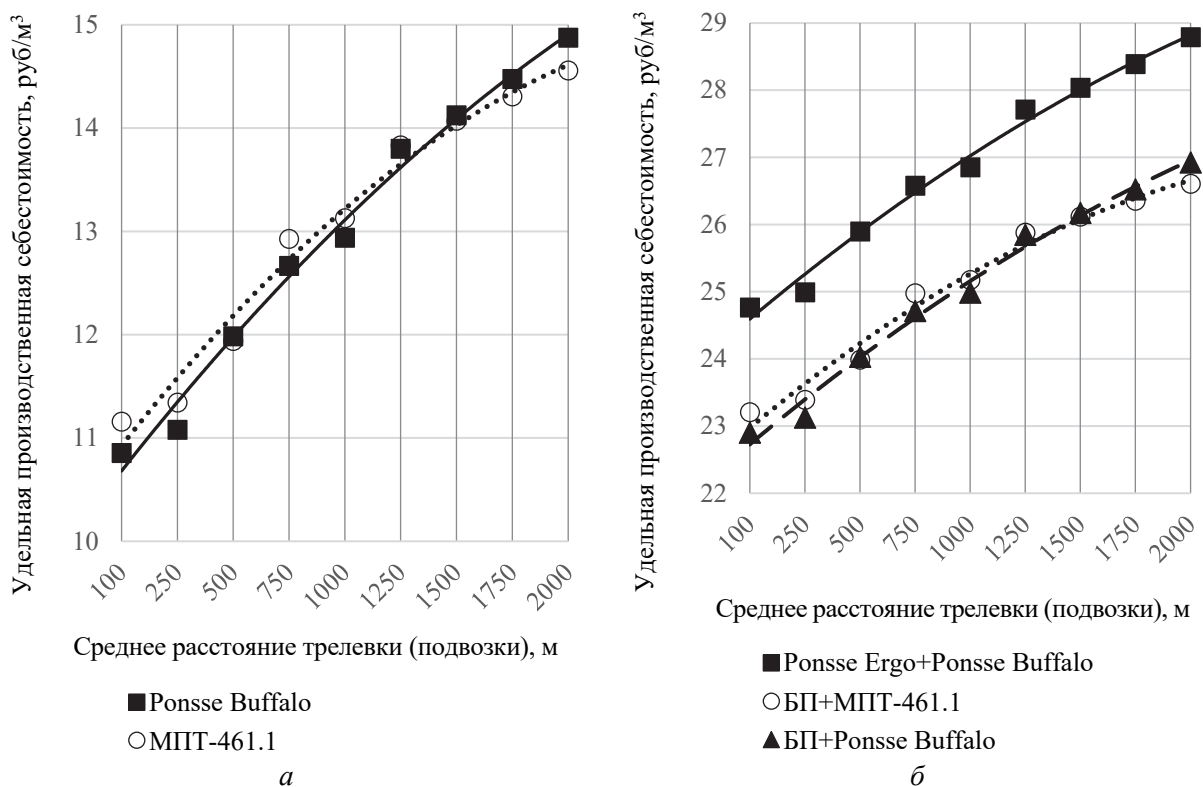


Рис. 3. Динамика изменения производственной себестоимости заготовки 1 м³ древесины от среднего расстояния подвозки сортиментов (при среднем объеме хлыста 0,5 м³): а – на операции подвозки сортиментов; б – в целом по системе машин

Заключение. На основании производственного опыта ОАО «Витебскдрев» можно сделать вывод, что основными факторами, влияющими на удельную производственную себестоимость заготовки древесины различными системами машин, являются средний объем хлыста и среднее расстояние трелевки (подвозки) древесины.

С увеличением среднего объема хлыста с 0,2 до 1,0 м³ удельная производственная себестоимость на операциях валки деревьев, их очистки от сучьев и раскряжевки на сортименты снижается: при применении харвестера Ponsse Ergo – на 30%, при использовании бензопилы Husqvarna-560XP – на 39%. Харвестер и бензопила являются сопоставимыми при среднем объеме хлыста до 0,22 м³, при разработке более крупных насаждений применение бензопил в среднем в 1,10–1,15 раза является более эффективным.

С увеличением среднего объема хлыста с 0,2 до 1,0 м³ (при постоянном расстоянии трелевки 500–700 м) удельная производственная себестоимость на операции трелевки (подвозки) древесины снижается незначительно: при применении форвардера Ponsse Buffalo – на 6%, при использовании погрузочно-транспортной машины МПТ-461.1 – на 7%. Применение Ponsse Buffalo в сравнении с МПТ-461.1 в среднем на 1–3% более эффективно.

При использовании рассматриваемых систем машин в насаждениях со средним объемом хлыста от 0,20 до 0,25 м³ все они являются сопоставимыми. При разработке более крупных насаждений применение систем машин с использованием бензопил является в среднем в 1,05–1,08 раза эффективнее машинного комплекса. При этом приоритет в использовании нужно отдавать специализированным форвардерам.

С увеличением среднего расстояния трелевки (подвозки) древесины со 100 до 2000 м удельная производственная себестоимость на операции трелевки древесины увеличивается: при использовании форвардера Ponsse Buffalo – на 39%, при применении погрузочно-транспортной машины МПТ-461.1 – на 31%. Использование Ponsse Buffalo в сравнении с МПТ-461.1 наиболее эффективно при среднем расстоянии трелевки (подвозки) до 1300 м. При больших расстояниях целесообразно применять МПТ-461.1.

В насаждениях со средним объемом хлыста 0,5 м³ в диапазоне трелевки древесины от 100 до 2000 м применение систем машин с использованием бензопил является в среднем в 1,07 раза эффективнее машинного комплекса. При этом специализированный форвардер Ponsse Buffalo эффективен на подвозке древесины до 1300 м, а прицепной форвардер МПТ-461.1 – свыше 1300 м.

Список литературы

1. Германович А. О., Леонов Е. А., Мохов С. П. Оборудование лесопромышленных предприятий. Практикум. Минск: БГТУ, 2020. 223 с.
2. Игнатенко В. В., Леонов Е. А. Установление рациональных параметров многооперационных машин в лесозаготовительной промышленности // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 5-4. С. 291–295.
3. Леонов Е. А., Клоков Д. В. Технология лесозаготовок и переработки древесины. Минск: БГТУ, 2018. 231 с.
4. Федоренчик А. С., Клоков Д. В., Леонов Е. А. Технология и оборудование лесосечных и лесоскладских работ. Минск: БГТУ, 2016. 204 с.
5. Клоков Д. В., Турлай И. В., Леонов Е. А. Оборудование лесопромышленных предприятий. Лабораторный практикум. Минск: БГТУ, 2015. 200 с.
6. Федоренчик А. С., Клоков Д. В., Леонов Е. А. Энергетическое использование древесной биомассы. Практикум. Минск: БГТУ, 2015. 212 с.
7. Технология и оборудование комплексного использования древесного сырья. Практикум / А. С. Федоренчик [и др.]. Минск: БГТУ, 2014. 274 с.
8. Григорьев И. В., Валяжонков В. Д. Современные машины и технологические процессы лесосечных работ. СПб.: Темплан, 2009. 287 с.
9. Инновационные технологии лесосечных работ / И. Р. Шегельман [и др.]. Петрозаводск: Verso, 2016. 134 с.
10. Жуков А. В. Теория лесных машин. Минск: БГТУ, 2001. 640 с.
11. Федоренчик А. С., Ледницкий А. В. Энергетическое использование низкокачественной древесины и древесных отходов. Минск: БГТУ, 2010. 446 с.
12. Матвейко А. П. Технология и оборудование лесозаготовительного производства. Минск: Техноперспектива, 2006. 444 с.
13. Леонов Е. А., Игнатенко В. В., Клоков Д. В. Оценка применения двухступенчатой трелевки по критерию удельной производственной себестоимости // 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. 150–152.
14. Совершенствование технологии освоения труднодоступного лесосечного фонда / А. А. Духовник [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (246). С. 196–201.
15. Леонов Е. А., Клоков Д. В., Исаченков В. С. Применение двухступенчатой трелевки в условиях Республики Беларусь // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (246). С. 202–207.

References

1. Hermanovich A. O., Leonov E. A., Mokhov S. P. *Oborudovaniye lesopromyshlennykh predpriyatiy. Praktikum* [Equipment for timber industry enterprises. Practicum]. Minsk, BG TU Publ., 2020. 223 p. (In Russian).
2. Ignatenko V. V., Leonov E. A. Establishment of rational parameters of multi-operation machines in the timber industry. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2015, vol. 3, no. 5–4, pp. 291–295 (In Russian).
3. Leonov E. A., Klokov D. V. *Tekhnologiya lesozagotovok i pererabotki drevesiny* [Logging and wood processing technology]. Minsk, BG TU Publ., 2018. 231 p. (In Russian).
4. Fedorenchik A. S., Klokov D. V., Leonov E. A. *Tekhnologiya i oborudovaniye lesosechnykh i lesoskladskikh rabot* [Technology and equipment for logging and timber storage operations]. Minsk, BG TU Publ., 2016. 204 p. (In Russian).
5. Klokov D. V., Turlay I. V., Leonov E. A. *Oborudovaniye lesopromyshlennykh predpriyatiy. Laboratornyy praktikum* [Equipment timber companies. Laboratory practicum]. Minsk, BG TU Publ., 2015. 200 p. (In Russian).
6. Fedorenchik A. S., Klokov D. V., Leonov E. A. *Energeticheskoye ispol'zovaniye drevesnoy biomassy. Praktikum* [Energy use of wood biomass. Practicum]. Minsk, BG TU Publ., 2015. 212 p. (In Russian).
7. Fedorenchik A. S., Mokhov S. P., Klokov D. V., Leonov E. A. *Tekhnologiya i oborudovaniye kompleksnogo ispol'zovaniya drevesnogo syr'ya. Praktikum* [Technology and equipment for the integrated use of wood raw material. Practicum]. Minsk, BG TU Publ., 2014. 274 p. (In Russian).

8. Grigor'ev I. V., Valyazhonkov V. D. *Sovremennyye mashiny i tekhnologicheskiye protsessy lesosechnykh rabot* [Modern machines and technological processes logging activities]. St. Petersburg, Templan Publ., 2009. 287 p. (In Russian).
9. Shegel'man I. R., Laurila Ya. T., Skrypnik V. I., Galaktionov O. N. *Innovatsionnyye tekhnologii lesosechnykh rabot* [Innovative logging technology]. Petrozavodsk, Verso Publ., 2016. 134 p. (In Russian).
10. Zhukov A. V. *Teoriya lesnykh mashin* [The theory of forest machines]. Minsk, BGTU Publ., 2001. 640 p. (In Russian).
11. Fedorenchik A. S., Lednitskiy A. V. *Energeticheskoye ispol'zovaniye nizkokachestvennoy drevesiny i drevesnykh otkhodov* [Energy use of low-quality wood and wood waste]. Minsk, BGTU Publ., 2010. 446 p. (In Russian).
12. Matveyko A. P. *Tekhnologiya i oborudovaniye lesozagotovitel'nogo proizvodstva* [Technology and equipment of timber production]. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ., 2006. 444 p. (In Russian).
13. Leonov E. A., Ignatenko V. V., Klokov D. V. Evaluation of the use of two-stage skidding according to the criterion of specific production cost. *Lesnaya inzheneriya, materialovedeniye i dizayn: materialy 86-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Forest engineering, materials science and design: materials of the 86th scientific and technical conference], Minsk, 2022, pp. 150–152 (In Russian).
14. Dukhovnik A. A., Leonov E. A., Ariko S. Ye., Klokov D. V. Perfection of technology development of difficult-cutting fund. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2021, no. 2 (246), pp. 196–201 (In Russian).
15. Leonov E. A., Klokov D. V., Isachenkov V. S. Using the two-stage skidding in the conditions of the Republic of Belarus. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2021, no. 2 (246), pp. 202–207 (In Russian).

Информация об авторах

Леонов Евгений Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: debager13@rambler.ru

Клоков Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидропневмоавтоматика и гидропневмопривод». Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, Республика Беларусь). E-mail: klokov_dm@mail.ru

Information about the authors

Leonov Evgeniy Anatol'yevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: debager13@rambler.ru

Klokov Dmitriy Viktorovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Hydropneumatic Automatics and Hydropneumatic Drive. Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: klokov_dm@mail.ru

Поступила 14.10.2022

УДК 004.942:630*31

Ю. И. Мисуно, П. А. Протас, Л. Н. Москальчук
Белорусский государственный технологический университет

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИН С ЛЕСНЫМИ ПОЧВОГРУНТАМИ

Решение задачи по оценке взаимодействия различных типов движителей лесозаготовительных машин с почвогрунтами получило дальнейшее развитие с использованием информационных технологий, которые формируют новые методы и способы проведения научных исследований в данной области. В последние годы широкое применение нашло использование систем автоматизированного проектирования (САПР) как более эффективного и достаточно точного инструмента для изучения сложных процессов качения деформируемого колесного движителя по деформируемому опорному основанию. При этом ключевым методом для определения основных характеристик исследуемого процесса взаимодействия является метод конечных элементов (МКЭ).

В данной работе рассмотрены вопросы применения САПР для проведения научных исследований и вычислительного эксперимента при изучении процесса взаимодействия пневматических шин, устанавливаемых на колесные движители лесозаготовительных машин, с почвогрунтами. Был проведен анализ применяемых систем и продуктов САПР, их технических возможностей для выполнения этапов моделирования и инженерных расчетов. Для решения задачи по определению параметров взаимодействия пневматического колеса с лесным почвогрунтом в работе были описаны особенности, необходимые условия и исходные данные с учетом выбранного программного обеспечения, характеристик исследуемых объектов, моделируемых условий их взаимодействия и определяемых параметров.

В статье дается заключение о роли вычислительного эксперимента в САПР в общей методологии научно-исследовательских работ, а также о целесообразности использования данного инструмента в совокупности с теоретическими и экспериментальными этапами исследований.

Ключевые слова: САПР, моделирование, инженерный анализ, метод конечных элементов, пневматические шины, лесной почвогрунт, деформируемое основание.

Для цитирования: Мисуно Ю. И., Протас П. А., Москальчук Л. Н. Применение систем автоматизированного проектирования для оценки взаимодействия пневматических шин с лесными почвогрунтами // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 111–120. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-12.

Yu. I. Misuno, P. A. Protas, L. N. Moskalchuk
Belarusian State Technological University

APPLICATION OF COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS TO ASSESS THE INTERACTION OF PNEUMATIC TIRES WITH FOREST SOILS

The solution of the problem of assessing the interaction of various types of logging machine propellers with soils has been further developed using information technologies that form new methods and ways of conducting scientific research in this area. In recent years, the use of computer-aided design (CAD) systems has found wide application as a more efficient and fairly accurate tool for studying complex processes of rolling a deformable wheel mover on a deformable support base. In this case, the key method for determining the main characteristics of the studied interaction process is the finite element method (FEM).

This paper discusses the issues of using CAD for scientific research and computational experiment in studying the process of interaction of pneumatic tires mounted on wheeled movers of logging machines with soils. An analysis of the applied CAD systems and products, their technical capabilities for performing the stages of modeling and engineering calculations was given. To solve the problem of determining the parameters of the interaction of a pneumatic wheel with forest soil, the paper describes the features, necessary conditions and initial data, taking into account the selected software, the characteristics of the objects under study, the simulated conditions for their interaction and the parameters to be determined.

The article gives a conclusion about the role of a computational experiment in CAD in the general methodology of research work, as well as the feasibility of using this tool in conjunction with the theoretical and experimental stages of research.

Keywords: CAD, modeling, engineering analysis, finite element method, pneumatic tires, forest soil, deformable base.

For citation: Misuno Yu. I., Protas P. A., Moskalchuk L. N. Application of computer-aided design systems to assess the interaction of pneumatic tires with forest soils. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 111–120. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-12 (In Russian).

Введение. Исследование процесса взаимодействия различных типов движителей лесных машин с почвогрунтами является важным пунктом в решении проблемы по освоению лесных участков со слабой несущей способностью грунтов. Характеристика данных условий, особенности изучаемого взаимодействия и негативные последствия как для техники, так и для лесного почвогрунта были описаны в научных трудах, в том числе и авторами данной работы.

Одними из ключевых и актуальных вопросов в данной области исследования являются: описание процесса качения пневматических шин повышенной проходимости по лесным слабонесущим почвогрунтам, определение параметров их взаимодействия; математическое описание процесса деформации; прогнозирование эффективности работы колесного движителя и степени повреждения лесного почвогрунта.

В свое время многие ученые отмечали сложность выполнения исследований взаимодействия колесного движителя с почвами ввиду многообразия влияющих факторов, их неоднородности и непостоянства. На сегодняшний день процесс движения деформируемого колеса по недеформируемой поверхности достаточно хорошо изучен. Однако с моделированием взаимодействия деформируемого колеса с деформируемым основанием возникают трудности. Для математического описания данных процессов необходимо составление сложных систем дифференциальных уравнений n -го порядка [1].

Задача упростилась благодаря использованию систем автоматизированного проектирования (САПР), которые позволяют в программной среде моделировать различные объекты, их физико-механические свойства, изменение состояния под действием различных внешних факторов и многое другое. На сегодняшний день программы САПР применяются для проектирования не только пневматических шин, но и в целом всех элементов ходовой системы лесозаготовительных машин. Также проводятся исследования процесса качения колесного движителя по различным поверхностям движения. Ключевыми инструментами для проведения таких исследований являются программные комплексы компьютерного инженерного анализа (computer-aided engineering – CAE), основанные на методе конечных элементов (МКЭ). Они позволяют решать многие задачи, в том числе

из области механики сплошных сред и материалов. В основе МКЭ лежат две главные идеи: дискретизация исследуемого объекта на конечное множество элементов и кусочно-элементная аппроксимация исследуемых функций (например, перемещений, напряжений, скоростей, температур и т. д.) [2, 3].

Использование метода конечных элементов при исследовании взаимодействия колеса с почвенно-грунтовым основанием рассматривалось в работе многих современных ученых [4–9].

В работе [4] представлены некоторые возможности применения МКЭ для исследования деформирования грунта колесом, а именно: создание материалов с конкретными физико-механическими свойствами, задание величины и направления нагрузок, граничные условия процесса взаимодействия пневматического колеса и лесного почвогрунта и др. Кроме того, здесь рассматриваются различные варианты моделей поведения деформируемого основания и подходы к решению задач механики грунтов. Представлен общий алгоритм решения этих задач в САПР. Как показал обзор [4], данный метод позволяет получить достаточно точные данные, сопоставимые с показаниями экспериментальных исследований.

Моделированием взаимодействия деформируемой шины с деформируемой поверхностью движения занимается группа исследователей: С. А. Bekakos, G. Parazafeiropoulos и др. [5–7]. Используя метод конечно-элементного моделирования, авторы проанализировали влияние внутреннего давления воздуха в шинах и вертикальной нагрузки на площадь контакта колеса с опорной поверхностью. Результаты компьютерного моделирования были близки к значениям исследований других авторов. Кроме того, конечно-элементный анализ позволил оценить влияние условий трения колеса с поверхностью движения на площадь контакта, а также расположение нитей корда в радиальных шинах на ее жесткость и вертикальный прогиб [5].

Пример решения конкретной задачи с применением МКЭ представлен в работе [8]. В данном исследовании показана модель пневматического колеса и влияние давления воздуха в шинах на распределение напряжения в почве. При этом были выделены некоторые

участки анализируемой шины, в которых напряжения повышены, а также установлено, что средняя площадь каркаса шины подвергается наибольшим деформациям. В результате была выявлена необходимость изменения параметров пневматических шин для снижения их износа.

Сравнение поведения связных и несвязных грунтов при различных параметрах вертикальной нагрузки и давления воздуха в шинах с применением МКЭ было проведено в работе [9]. Полученные результаты были подтверждены лабораторными испытаниями, что позволило сформулировать ряд рекомендаций по минимизации уплотнения грунта.

На основании вышесказанного можно сделать вывод о том, что применение САПР как инструмента для проведения научных исследований и вычислительных экспериментов для изучения процесса взаимодействия пневматического колеса с почвогрунтом является одним из достоверных методов, а также альтернативой экспериментам, проводимых в полевых условиях с высокими материальными и трудовыми затратами.

Суть представленной работы заключается в изучении возможностей современных систем автоматизированного проектирования и инженерного анализа, а также в определении необходимых условий и данных для компьютерного моделирования исследуемого процесса.

Стоит принять во внимание, что проводимые исследования не направлены на разработку новых типов пневматических шин повышенной проходимости или материалов для их изготовления. Основные результаты проектирования и инженерного анализа изучаемого процесса в программах САПР позволяют сформулировать рекомендации по параметрам шин и задать диапазон их механических характеристик, при которых будут соблюдаться требования по минимизации негативного влияния колесного движителя на лесной почвогрунт и будет обеспечена эффективная работа машин в сложных эксплуатационных условиях [10].

Основная часть. Анализ программного обеспечения САПР. В настоящее время применяется большое количество систем САПР, которые позволяют решать различные задачи во многих областях. Выбор того или иного продукта будет зависеть от следующих факторов:

– целевое назначение (создание геометрических чертежей и 3D-моделей (CAD-системы – computer-aided design), автоматический анализ, расчет и симуляция физических процессов (CAE-системы – computer-aided engineering), автоматизированная подготовка

производства (САМ-системы – computer-aided manufacturing));

– область объекта моделирования (машиностроение, архитектура, радиоэлектроника, геоинформационные объекты и др.);

– сложность и разновидность проектируемого объекта (от простых до очень сложных объектов (свыше 10 000 составных объектов));

– уровень комплексности (одно-, многоэтапные и комплексные САПР) и др. [11].

Кроме того, по своим функциональным возможностям продукты САПР делятся на три класса:

– легкие – служат для выполнения почти всех работ с двумерными чертежами и имеют ограниченный набор функций по трехмерному моделированию;

– средние – это программные комплексы, которые объединяют в себе возможности геометрического моделирования и задания условий для автоматизированной подготовки производства;

– тяжелые – применяются для моделирования поведения сложных механических систем в реальном масштабе времени, оптимизации расчетов с визуализацией результатов и т. д. [12].

Ранее было отмечено, что для автоматизированного инженерного анализа с применением программных комплексов в основном используется метод конечных элементов (МКЭ), в особенности для анализа напряжений и деформаций. Этапы решения задач с применением данного метода включают в себя:

- 1) построение геометрических чертежей и 3D-моделей;
- 2) задание физико-механических свойств материала;
- 3) создание сетки конечных элементов;
- 4) задание нагрузок и граничных условий;
- 5) численное решение системы уравнений;
- 6) визуализация и анализ результатов [13, 14].

Выполнение задачи по исследованию процесса взаимодействия пневматического колеса с почвогрунтом может осуществляться с применением сложных комплексных программ, которые позволяют реализовывать все этапы проектирования и инженерного анализа в одной программной среде. Альтернативным вариантом может стать применение нескольких продуктов САПР, каждый из которых будет использоваться на отдельных стадиях исследовательской работы.

Для создания геометрических чертежей, схем, 3D-моделей отдельных объектов и сборных конструкций широкое применение нашли следующие CAD-системы: Компас 3D, AutoCAD 3D, NanoCAD, T-FLEX CAD, Autodesk Inventor, SolidWorks, PTC Creo, NX Siemens,

Catia и др. Для выполнения остальных этапов применяются более сложные системы инженерного анализа (CAE), которые позволяют осуществлять математический анализ, прочностные расчеты, кинематические исследования поведения разрабатываемого объекта в различных условиях: Ansys Workbench, SIMULIA Abaqus, MSC Software (Nastran, Patran, Marc и др.), LS-DYNA, COSMOS и т. д. Чаще всего в системы CAE интегрированы модули для создания и работы с геометрическими моделями. Однако в большинстве своем данный модуль требуется для упрощения или изменения формы исходной модели. Поэтому инструментарий для создания точной 3D-модели у таких систем ограничен. Основные ресурсы данных программ направлены на увеличение списка решаемых задач, расширение математического обеспечения, библиотеки материалов и конечных элементов.

Поэтому разработка геометрической модели может осуществляться и в отдельном программном пакете, так как между современными системами CAD и CAE существует интеграция и предусмотрено применение единых форматов для импорта и экспорта разрабатываемых объектов (Parasolid, Step).

Примером системы САПР, которая позволяет осуществлять все этапы моделирования и инженерного анализа, является программа **SIMULIA Abaqus**. Это универсальный программный комплекс, имеющий возможность осуществлять расчеты на основе МКЭ. Особенностью интерфейса данной программы является наличие модулей, в которых содержится определенный набор действий и инструментов для выполнения всех этапов компьютерного моделирования (рис. 1).

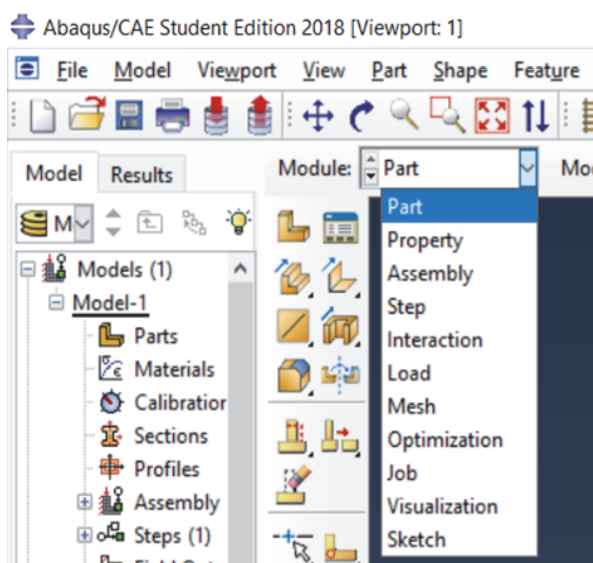


Рис. 1. Набор модулей в SIMULIA Abaqus

Функции модулей состоят в следующем:

PART – для создания деталей, задания их геометрии, опорных точек и систем координат;

PROPERTY – для задания свойств материалов, сечений, применяемых в модели;

ASSEMBLY – для задания взаимного расположения деталей, а также сборки их в единую модель;

STEP – для создания шагов расчета и определения выходных данных по результатам;

INTERACTION – для определения взаимодействий между деталями, контактных участков и их свойств;

LOAD – для создания нагрузок, прикладываемых к модели, а также начальных и граничных условий для нее;

MESH – для построения конечно-элементной сетки;

JOB – для проверки созданной модели, запуска вычислительного процесса и контроля над ним;

VISUALIZATION – для просмотра результатов расчета и обработки полученных данных;

SKETCH – для сохранения эскизов и чертжей полученной модели.

Из главных характеристик программы Abaqus в области проектирования шин можно отметить следующие:

- широкий выбор гиперэластичных моделей состояния для резиновых материалов, используемых в шине;

- возможность переноса геометрии и результатов анализа от осесимметричной модели (используемой в анализе задач посадки на диск, надува шины) к трехмерной модели (применяемой в задаче статического нагружения при контакте с дорогой);

- эффективное вычисление реакции в задаче постоянного качения шины для заданной скорости с использованием смешанного подхода Эйлера – Лагранжа в Abaqus/Standard;

- моделирование нестационарных динамических процессов для больших моделей с помощью Abaqus/Explicit [15].

Программа Abaqus дает возможности создавать пластичные, анизотропные, композитные, слоистые, гиперэластичные материалы и др., задавать их численные характеристики, особенности параметров сечения создаваемых объектов и т. д. Поэтому в данной программе можно создавать материалы и свойства для исследуемых шин и лесного почвогрунта. Причем создавать их можно как из имеющихся данных в программе, так и с использованием результатов экспериментов на нагрузку – деформации.

Для создания геометрических и объемных моделей можно рассматривать программы **КОМПАС 3D** и **NX Siemens**. Данные программы

имеют широкий инструментарий для твердотельного, поверхностного и каркасного моделирования (рис. 2).

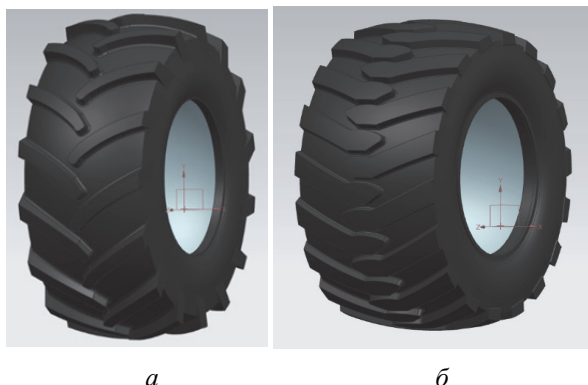


Рис. 2. Модели пневматических шин в NX Siemens:
а – 30,5L-32LS; б – 700/50-26,5

Учебная версия КОМПАС 3D является существенно системой CAD, которая позволяет создавать сложные 3D-модели и сборочные конструкции. Интерфейс программы на русском языке и наличие большого количества инструментов позволяет быстро ее освоить и создавать достаточно точные модели исследуемых объектов. Использование данной программы для первой стадии исследовательских работ в комплексе с другими продуктами САПР также возможно, так как она позволяет сохранять создаваемые объекты и импортировать их в стандартных форматах Parasolid и Step.

Программа NX Siemens обладает более широкими возможностями по сравнению с КОМПАС 3D. Помимо модуля CAD, данный пакет позволяет создавать конечно-элементную модель (рис. 3), задавать механические свойства материала, используя при этом стандартную библиотеку, или создавать новый материал с определенными параметрами. В данной программе имеется расчетный модуль для решения различных конструкторских задач.

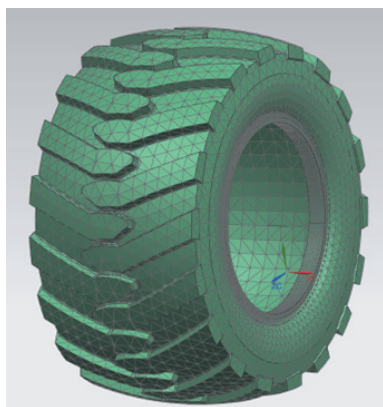


Рис. 3. Конечно-элементная модель пневматического колеса в NX Siemens

К сложным комплексным САПР, которые широко применяются для выполнения инженерного анализа, относится **Ansys Workbench**. В данной программе применяется МКЭ для решения широкого круга задач: линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твердого тела и конструкций, прочих задач механики [16].

В Ansys работа осуществляется с импортируемыми моделями, которые в последующем могут дорабатываться или видоизменяться перед выполнением численного моделирования. В САЕ-системах для выполнения инженерного анализа на основе геометрических моделей разрабатывается расчетная схема без существенных подробностей конструкций, которые могут усложнить расчет или сделать его невыполнимым [17].

Приведенные примеры САПР представляют собой выборку наиболее подходящих для данной области научных исследований, используемых при выполнении проектных, расчетных, технологических и научных задач. В целом анализ и обзор САПР показал, что выбор той или иной системы для выполнения научно-исследовательской работы в первую очередь зависит от области решаемой задачи и имеющихся опций в рассматриваемой системе. Следующим фактором является обеспечение импорта моделей с сохранением точности геометрии, дерева построения, последующего изменения геометрии или формы модели, ее характеристик (физико-механических и других свойств материала) и др.

Также не менее важным при выборе САПР является наличие соответствующих программ или возможности приобретения лицензированных или учебных (академических) версий ПО. Во втором случае это, как правило, бесплатные полностью рабочие продукты, но с ограниченным функционалом, например, при создании конечно-элементных моделей (для студенческой версии SIMULIA Abaqus допускается не более 1000 узлов в одном объекте, в Ansys Workbench – 32 000 узлов или элементов для прочностных задач).

Особенности создания 3D-моделей исследуемых объектов. При изучении процесса взаимодействия колесного движителя с поверхностью движения в качестве объектов исследования выступают пневматическая шина и лесной почвогрунт. Как отмечалось ранее, первым этапом вычислительного эксперимента в системах САПР является построение 3D-модели. Причем для последующих расчетов исследуемого процесса качения колеса

эти объекты необходимо создавать в «сборе», другими словами, задавать условия их взаимного расположения.

Наиболее простой является разработка 3D-модели почвогрунта. Для проводимых исследований достаточно отобразить объемную модель участка поверхности движения, которая будет испытывать на себе воздействие колеса. По периметру размеры рассматриваемого участка опорной поверхности принимаются несколько большими, чем фактический размер образуемой колеи при работе машин на слабонесущих почвах. Толщину слоя почвогрунта рекомендуется принимать равной максимальной глубине распределения напряжений под колесом (минимум 50 см). В последующем, после получения результатов расчетов и их визуализации исходные параметры исследуемого участка могут корректироваться.

Более сложными в объемном проектировании являются пневматические шины. Для последующего сравнения результатов вычислительного эксперимента в САПР с результатами теоретических и экспериментальных исследований [18] в качестве объектов исследования приняты шины передних и задних колес форвардера «Амкодор 2661-01» (см. рис. 2). Здесь представлены достаточно точные модели рассматриваемых шин с необходимой детализацией грунтозацепов. Их наличие в конструкции шин, а также их параметры необходимо учесть при исследовании процесса взаимодействия колеса с деформируемым основанием. В этом случае создание сетки конечно-элементной модели может усложниться, а последующий расчет в программной среде может занять продолжительное время. Поэтому предложено упростить форму представленной модели пневматической шины, принимая во внимание симметричность ее конструкции (рис. 4).

Несмотря на представленный разрез модели колеса, полученные результаты расчетов будут учитывать фактические размеры колеса, но при этом количество расчетов и их продолжительность будут сокращены за счет снижения числа узлов и элементов в расчетной схеме. Однако сразу следует принять допущение, что распределение нагрузки по пятну контакта также будет симметричным.

Материалы и механические свойства проектируемых объектов. Одним из ключевых факторов при выполнении расчетов исследуемых объектов шин является задание материала и его физико-механических свойств.

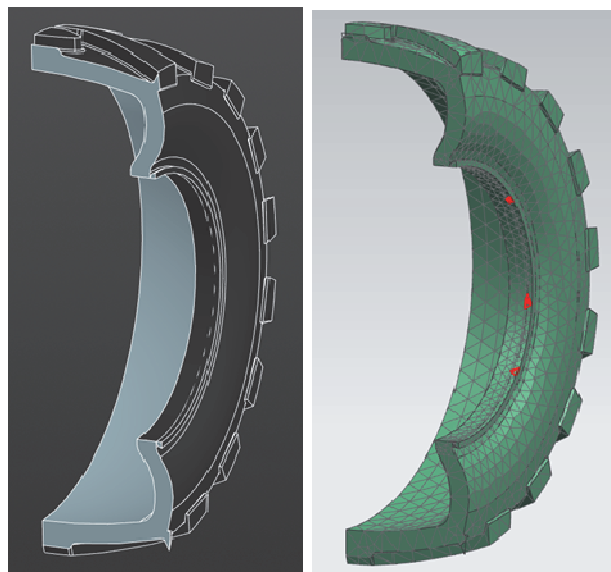


Рис. 4. Разрез пневматической шины 700/50-26.5 и ее конечно-элементная модель

Конструкция пневматических шин повышенной проходимости включает в себя каркас и брекер, армированные слоями корда, протектор, боковина, борт и др. [19]. С точки зрения механики материалов пневматическую шину можно представить в виде эластичной оболочки, состоящей из слоев армированного резино-корда с анизотропными свойствами. Механические свойства компонентов композитного материала, из которого изготовлена пневматическая шина, значительно отличаются друг от друга. Так, модуль упругости нитей корда в 2–4 раза выше, чем резины, так как первые в основном воспринимают нагрузку от внутреннего давления воздуха в шине [20, 21]. В таблице приводятся ориентировочные значения механических характеристик конструктивных элементов пневматической шины [22].

Представленные данные могут быть использованы для уточнения характеристик задаваемого материала пневматической шины. В качестве проверки точности можно провести моделирование взаимодействия проектируемой шины с жестким основанием в САПР, а полученные результаты сравнить с экспериментальными данными [18].

При задании материала лесного почвогрунта необходимо учитывать его фундаментальные свойства, которые были рассмотрены в работах ранее [23]. Так, для описания процесса деформации почвогрунта учитываются его упруго-пластично-вязкие свойства, которые характеризуются такими параметрами, как модуль деформации, коэффициент Пуассона, модуль сдвига, коэффициент вязкости, пластичности и др.

Физико-механические характеристики элементов конструкции пневматической шины [22]

Элемент	Модуль упругости, Па	Коэффициент Пуассона	Плотность материала, кг/м ³
Каркас	$(1,07-1,27) \cdot 10^8$	0,0038–0,451	1351
Бреккер с нитями корда	$2,11 \cdot 10^{11}$	0,30	7860
Протектор	$14,0 \cdot 10^6$	0,45	1173
Боковина	$5,05 \cdot 10^6$	0,45	1132
Борта	$5,05 \cdot 10^6$	0,45	7860

Для более точного расчета дополнительно могут быть проведены экспериментальные исследования по определению параметров осадки штампа в зависимости от оказываемой нагрузки. Полученные данные вносятся в табличном виде и позволяют программе определить зависимость, по которой будет осуществляться расчет.

Алгоритм выполнения исследований с применением САПР. Основным преимуществом использования систем САПР является сокращение трудоемкости и времени на проведение исследований по сравнению с экспериментами в производственных условиях с реальной техникой. Но в то же время стоит принять во внимание, что качественное выполнение моделирования и расчетов в программной среде зависит от наличия необходимых данных. Поэтому первоначальная стадия работ для проведения вычислительных экспериментов в САПР должна включать в себя формулировку целей и задач проводимых исследований, сбор и подготовку исходных данных, разработку математического обеспечения, получение результатов аналитических и экспериментальных исследований.

Анализ возможностей различных продуктов САПР позволил определиться с тем, какие программные комплексы могут быть использованы для решения поставленной задачи. Так, для геометрического моделирования может быть использован NX Siemens, а последующие этапы по созданию конечно-элементной сетки, задания нагрузки, граничных условий и непосредственного расчета ведутся в Ansys Workbench.

Необходимый набор исходных данных будет формулироваться на основании объектов исследований, поставленных задач по изучению определенных процессов и получению конкретных данных.

Особенности создания геометрической модели почвогрунта были описаны ранее. Для моделирования исследуемых шин необходимо знать их типоразмер (диаметр, ширину, высоту профиля), геометрические характеристики профиля шины в сечении и параметры грунтозацепов. Создание точной модели шины возможно при наличии параметров пресс-формы соответ-

ствующего типоразмера, которая используется на производстве. При отсутствии таковых трехмерную модель шины можно создать по данным фактического обмера исследуемых шин или с использованием 3D-сканера.

Следующий набор исходных данных включает в себя характеристики материала. С учетом исследуемых объектов в данный набор будут входить такие параметры:

- для шины: модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность материала;
- для почвогрунта: модуль деформации, коэффициент Пуассона, модуль сдвига, коэффициент вязкости, пластичности и др. Перечень задаваемых параметров будет зависеть от принятой реологической модели лесного почвогрунта.

Ключевым элементом в инженерном анализе исследуемого процесса в системах САПР является математическое обеспечение. Это имеющийся или разрабатываемый математический аппарат, на основании которого ведется расчет, анализ и оптимизация исследуемых процессов.

Проведение инженерного анализа в САПР предусматривает определение основных параметров взаимодействия движителя с опорным основанием: площади контакта, распределения давления по площади контакта и распределения напряжения по глубине почвогрунта. Исследование данных параметров необходимо проводить путем варьирования следующих показателей: вертикальная нагрузка от колеса на почвогрунт, которая будет зависеть от принимаемой массы машины, ее загруженности и распределения нагрузки по осям, физико-механических параметров пневматической шины и почвогрунта.

Оценка точности полученных результатов будет осуществляться путем сравнения их с теоретическими данными при использовании разработанной математической модели деформирования лесного почвогрунта под действием колесного движителя [23] и/или с экспериментальными данными.

Заключение. Ключевые результаты работы, представленные в данной статье, получены путем обзора литературных источников,

изучения программных комплексов САПР и их возможностей путем непосредственного выполнения задач по моделированию и проектированию. В результате был сделан вывод о целесообразности включения в общую методологию проведения научно-исследовательских работ применения современных информационных систем и технологий. Их очевидные преимущества заключаются в том, что они не только позволяют частично или полностью исключить проведение экспериментальных исследований, но и дают возможность проектировать различные конструкции и моделиро-

вать самые сложные процессы, что способствует их углубленному изучению, рассмотрению всех влияющих факторов по отдельности или в комплексе, использованию сложных математических описаний и т. д. Однако несмотря на все вышесказанное при проведении научных исследований обязательно наличие результатов экспериментальных и теоретических исследований, которые являются важной частью проверки точности и адекватности получаемых данных, а также возможности моделирования исследуемых процессов по реальным опытным значениям.

Список литературы

1. Болдовский В. Н. Исследование процессов взаимодействия ходовых систем автомобилей с деформируемой опорной поверхностью // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2012. № 5/4. С. 50–52.
2. Фокин В. Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твердого тела. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. 131 с.
3. Ширвель П. И. Основы метода конечных элементов в мехатронике: в 2 ч. Ч. 1. Минск: БНТУ, 2015. 89 с.
4. Использование метода конечных элементов для решения задач террамеханики / Д. С. Тесленко [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. П. Е. Алексеева. 2014. № 5. С. 52–58.
5. Pneumatic tyres interacting with deformable terrains / C. A. Bekakos [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 744, no. 1. P. 1–12. DOI: 10.1088/1742-6596/744/1/012213.
6. Development of accurate pneumatic tyre finite element models based on an optimization procedure / C. A. Bekakos [et al.] // VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Crete, June 5–10th 2016. Vol. 1. Crete, 2016. P. 8262–8274.
7. Bekakos C. A., Papazafeiropoulos G. Finite element modeling of a pneumatic tyre interacting with rigid road and deformable terrain // Int. J. Vehicle Performance. 2017. Vol. 3, no. 2. P. 142–166.
8. FEM model to study the influence of tire pressure on agricultural tractor wheel deformations / S.-St. Biris [et al.] // Engineering for Rural Development: Proceedings of the 10th International Scientific Conference. Jelgava, Latvia, 26–27 May 2011. Jelgava, 2011. Ref. 9. P. 223–228.
9. Ungureanu N., Vlăduț V., Biriș S.-Șt. FEM modelling of soil behavior under compressive loads // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 163. P. 1–10. DOI: 10.1088/1757-899X/163/1/012001.
10. Мисуно Ю. И., Протас П. А. Особенности конструкции шин лесозаготовительных машин и пути их совершенствования // Технология и техника лесной промышленности: тез. докл. 82-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 6–7 февр. 2018 г. Минск, 2018. С. 27–28.
11. Бесхлебников И. В. Классификация САПР и их функциональное назначение // Международный студенческий научный вестник. 2019. № 6. URL: <https://s.eduherald.ru/pdf/2019/6/19836.pdf> (дата обращения: 15.10.2022).
12. Общие сведения о САПР. Классификация и состав САПР // ИНФОТЕХ. URL: <http://infotech.h1n.ru/gallery/sl2.pdf> (дата обращения: 20.09.2022).
13. Шимановский А. О., Путятю А. В. Применение метода конечных элементов в решении задач прикладной механики. Гомель: БелГУТ, 2008. 61 с.
14. Унянин А. Н., Евстигнеев А. Д. Моделирование и инженерный анализ с помощью программного комплекса NX. Ульяновск: УлГУ, 2017. 212 с.
15. Рыжов С. А., Ильин К. А., Варюхин А. Н. Проектирование шин с использованием программного комплекса ABAQUS // САПР и графика. 2006. № 1. URL: <https://sapr.ru/article/> (дата обращения: 05.10.2022).
16. Автоматизированное моделирование и расчет конструкций в ANSYS: одномерные модели / О. А. Саченков [и др.]. Казань: Казан. ун-т, 2019. 140 с.
17. Иванов Д. В., Доль А. В. Введение в Ansys Workbench. Саратов: Амирит, 2016. 56 с.

18. Протас П. А., Мисуно Ю. И. Исследование давления колесного движителя форвардера «АМКОДОР 2661-01» на опорную поверхность // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2017. № 2. С. 251–258.

19. Касперович А. В., Шашок Ж. С., Мозгалев В. В. Технология производства шин. Минск: БГТУ, 2011. 147 с.

20. Яковлев М. Я. Моделирование эффективных механических характеристик резинокорда при конечных деформациях: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18. М., 2014. 126 л.

21. Хотько А. В., Шилько С. В. Применение теории сетчатых оболочек при проектировании автомобильных шин диагональной конструкции // Механика машин, механизмов и материалов. 2020. № 1 (50). С. 5–11.

22. Assessment of Mechanical Properties of Offroad Vehicle Tire: Coupons Testing and FE Model Development / P. Baranowski [et al.] // Acta Mechanica et Automatica. 2012. No. 2. P. 17–22.

23. Мисуно Ю. И., Протас П. А. Решение задачи определения воздействия движителя на почвогрунт с учетом реологических факторов // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы докладов 85-й науч.-техн. конф. (с междунар. участием), Минск, 1–13 февр. 2021 г. Минск, 2021. С. 46–47.

References

1. Boldovskiy V. N. Investigation of the processes of interaction of running systems of cars with a deformable supporting surface. *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern European Journal of Advanced Technology], 2012, no. 5/4, pp. 50–52 (In Russian).

2. Fokin V. G. *Metod konechnykh elementov v mekhanike deformiruyemogo tvordogo tela* [Finite element method in solid mechanics]. Samara, Samara State Technical University Publ., 2010. 131 p. (In Russian).

3. Shirvel' P. I. *Osnovy metoda konechnykh elementov v mekhatronike: v 2 chastyakh*. Chast' 1 [Fundamentals of the finite element method in mechatronics: in 2 parts. Part 1]. Minsk, BNTU Publ., 2015. 89 p. (In Russian).

4. Teslenko D. S., Belyakov V. V., Makarov V. S., Zezyulin D. V. Using the Finite Element Method to Solve Terramechanics Problems. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni R. E. Alekseeva* [Proceedings of the R. E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University], 2014, no. 5, pp. 52–58 (In Russian).

5. Bekakos C. A., Papazafeiropoulos G., O'Boy D. J., Prins J. Pneumatic tyres interacting with deformable terrains. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 744, no. 1, pp. 1–12. DOI: 10.1088/1742-6596/744/1/012213.

6. Bekakos C. A., Papazafeiropoulos G., O'Boy D. J., Prins J. Development of accurate pneumatic tyre finite element models based on an optimization procedure. *VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, Crete, 2016, vol. 1, pp. 8262–8274.

7. Bekakos C. A., Papazafeiropoulos G. Finite element modeling of a pneumatic tyre interacting with rigid road and deformable terrain. *International Journal of Vehicle Performance*, 2017, vol. 3, no. 2, pp. 142–166.

8. Biris S.-St., Ungureanu N., Maican E., Murad E., Vladut V. FEM model to study the influence of tire pressure on agricultural tractor wheel deformations. *Engineering for Rural Development: proceedings of the 10th International Scientific Conference*. Jelgava, Latvia, 2011, ref. 9, pp. 223–228.

9. Ungureanu N., Vlăduț V., Biris S.-Șt. FEM modelling of soil behavior under compressive loads. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 163, pp. 1–10. DOI: 10.1088/1757-899X/163/1/012001.

10. Misuno Yu. I., Protas P. A. Features of the design of forest machine tires and ways to improve them. *Tekhnologiya i tekhnika lesnoy promyshlennosti: tezisy докладов 82-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Technique and technology of the forest industry: abstracts of the 82nd scientific and technical conference of faculty, researchers and graduate students]. Minsk, 2018, pp. 27–28 (In Russian).

11. Beskhlebnikov I. V. Classification of CAD and their functional purpose. *Mezhdunarodnyy studentcheskiy nauchnyy vestnik* [International Student Science Bulletin], 2019, no. 6. Available at: <https://s.eduherald.ru/pdf/2019/6/19836.pdf> (accessed 15.10.2022) (In Russian).

12. General information about CAD. Classification and composition of CAD. Available at: <http://infotech.h1n.ru/gallery/sl2.pdf> (accessed 20.09.2022) (In Russian).

13. Shimanovskiy A. O., Putyato A. V. *Primeneniye metoda konechnykh elementov v reshenii zadach prikladnoy mekhaniki* [Application of the finite element method in solving problems of applied mechanics]. Gomel, BelGUT Publ., 2008. 61 p. (In Russian).

14. Unyanin A. N., Evstigneev A. D. *Modelirovaniye i inzhenernyy analiz s pomoshch'yu programmnogo kompleksa NX* [Modeling and Engineering Analysis with NX Software]. Ulyanovsk, UIGU Publ., 2017. 212 p. (In Russian).
15. Ryzhov S. A., Il'in K. A., Varyuhin A. N. Tire design using the ABAQUS software package. *SAPR i grafika* [CAD and graphics], 2006, no. 1. Available at: <https://sapr.ru/article/> (accessed 05.10.2022) (In Russian).
16. Sachenkov O. A., Sachenkov A. A., Bol'shakov P. V., Gerasimov O. V. *Avtomatizirovannoye modelirovaniye i raschyot konstruktiv v ANSYS: odnomernyye modeli* [Automated Modeling and Structural Analysis in ANSYS: 1D Models]. Kazan, Kazanskiy University Publ., 2019. 140 p. (In Russian).
17. Ivanov D. V., Dol' A. V. *Vvedeniye v Ansys Workbench* [Introduction to Ansys Workbench]. Saratov, Amirit Publ., 2016. 56 p. (In Russian).
18. Protas P. A., Misuno Yu. I. Investigation of pressure of the forwarder "AMKODOR 2661-01" wheeler on the base surface. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2017, no. 2, pp. 251–258 (In Russian).
19. Kasperovich A. V., Shashok Zh. S., Mozgalev V. V. *Tekhnologiya proizvodstva shin* [Tire production technology]. Minsk, BSTU Publ., 2011. 147 p. (In Russian).
20. Yakovlev M. Ya. *Modelirovaniye effektivnykh mekhanicheskikh kharakteristik rezinokorda pri konechnykh deformatsiyakh. Dissertatsiya kandidata fiziko-matematicheskikh nauk* [Modeling the effective mechanical characteristics of the rubber cord at finite deformations. Dissertation PhD (Physics and Mathematics)]. Moscow, 2014. 126 p. (In Russian).
21. Hot'ko A. V., Shil'ko S. V. Application of the theory of mesh shells in the design of diagonal car tires. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2020, no. 1 (50), pp. 5–11 (In Russian).
22. Baranowski P., Bogusz P., Gotowicki P., Małachowski J. Assessment of Mechanical Properties of Offroad Vehicle Tire: Coupons Testing and FE Model Development. *Acta Mechanica et Automatica*, 2012, no. 2, pp. 17–22.
23. Misuno Yu. I., Protas P. A. Solving the problem of determining the impact of the mover on the soil, taking into account rheological factors. *Lesnaya inzheneriya, materialovedeniye i dizayn: materialy dokladov 85-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Forest engineering, materials science and design: proceedings of the 85th scientific and technical conference]. Minsk, 2021, pp. 46–47 (In Russian).

Информация об авторах

Мисуню Юлия Игоревна – ассистент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: julia.misuno@belstu.by

Протас Павел Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: protas@belstu.by

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 authors

Misuno Yuliya Igorevna – assistant, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: julia.misuno@yandex.ru

Protas Pavel Aleksandrovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: protas@belstu.by

Moskalchuk Leonid Nikolaevich – DSc (Engineering), PhD (Agricultural), Associate Professor, Professor, the Department of Forestry. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lnm@belstu.by

Поступила 15.10.2022

УДК 630*377.21-047.37

А. О. Шошин

Белорусский государственный технологический университет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОБИЛЬНОЙ КАНАТНОЙ ТРЕЛЕВОЧНОЙ УСТАНОВКИ В РАВНИННЫХ УСЛОВИЯХ

Выполненные экспериментальные исследования раскрывают новые особенности заготовки древесины с помощью канатных трелевочных установок. Предмет исследований – усилия в тяговом канате. Испытания были направлены на изучение отдельных операций первичного транспорта древесины на лесосеке и полного цикла в целом. Объектом исследования выступала установка МТК-431 с неподвижным несущим канатом.

Выполнялся полный цикл трелевки пачки от подъема груза возле места чоковойки до разгрузки пачки на верхнем складе. Проводилось сравнение усилий в тяговом канате при перемещении пачки по трелевочному коридору волоком и в полуподвешенном положении. Получены данные о влиянии лобовых сопротивлений в виде пней при подтрелевке к трелевочному коридору и лежащих лесоматериалов при трелевке по трелевочному коридору.

Было определено, что перемещение лесоматериалов волоком на трелевочном коридоре без лобовых препятствий более эффективно, чем в полуподвешенном положении. Выделены особенности перемещения лесоматериалов на подтрелевке и установлено, что перемещение пачки от места валки к оси трелевочного волока сопряжено с преодолением препятствий в виде пней, которые создают значительные усилия, многократно превышающие массу трелеваемой пачки. Заданы направления для дальнейшего развития проблемного вопроса первичного транспорта древесины на заболоченных лесных территориях.

Ключевые слова: тяговый канат, трелевка, усилие, лесоматериал, трелевочный коридор.

Для цитирования: Шошин А. О. Экспериментальные исследования мобильной канатной трелевочной установки в равнинных условиях // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 121–132. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-13.

A. O. Shoshyn

Belarusian State Technological University

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THE CABLE YARDER IN FLAT CUTTING AREAS

The experimental researches carried out reveal new features of wood harvesting with the help of cable skidders. The subject of the research was the effort in the traction rope and the tests were directed both to the study of individual operations and to the study of the complete cycle of the primary transport of wood in the cutting area. The object of the study was the MTK-431 installation with a fixed carrier rope. A full cycle of hauling a pack was carried out from lifting the load near the place of chocking to unloading the pack in the upper warehouse. A comparison was made of the efforts in the traction rope when moving the bundle along the skidding corridor by drag and in a semi-suspended position. Data were obtained on the influence of frontal resistance in the form of stumps when skidding to the skidding corridor and lying timber during skidding along the skidding corridor. It was determined that the movement of timber by dragging on a logging corridor without frontal obstacles is more efficient than in a semi-suspended position. The peculiarities of the movement of timber on skidding are highlighted and it is established that the movement of a pack from the place of felling to the axis of the skidding portage is associated with overcoming obstacles in the form of stumps, which create significant forces many times greater than the mass of the skidding pack. Directions for further development of the problematic issue of the primary transport of timber in swampy forest areas have been set.

Keywords: mainline, yarding, pulling force, timber, skyroad.

For citation: Shoshyn A. O. Experimental researches of the cable yarder in flat cutting areas. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 121–132. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-13 (In Russian).

Введение. Анализ экспериментальных исследований [1–15] по изменению усилий в тяговом канате при работе трелевочных установок в горной местности показал, что нельзя в полной мере

использовать опыт работы в пересеченной местности для равнинных условий. Достаточно сложную задачу представляло собой выявление особенностей изменения усилий при прохождении

различных этапов пути, так как в данных исследованиях трелевочный коридор пролегал через пересяченную местность с большим перепадом высот. В таких условиях было сложно определить основной фактор воздействия.

На основании всех изученных материалов можно сказать, что только Ходосовский М. В. проводил исследования работы канатных трелевочных установок в равнинной заболоченной местности [4] и выявил, что увеличение высоты подъема вершин пачки напрямую влияет на повышение проходимости пачки при трелевке.

Экспериментально установлено, что усилие в тяговом канате возрастает при стопорении пачки с кареткой [5, 6, 7]. Матвеев Э. Н. установил [5], что коэффициент динамичности при стопорении с кареткой при подъеме пачки со скоростью 0,28–1,5 м/с изменяется в диапазоне 1,04–1,39. При этом наибольшие значения соответствовали меньшим объемам пачки.

В публикации [1] исследовались изменения усилий в несущем канате при выполнении трелевки «с горы». Датчик силы был установлен у верхней тыловой опоры между несущим канатом и блочным узлом. Результаты измерений показали, что подтрелевка древесины к несущему канату оказывает наибольшее влияние на динамику величины усилия по сравнению с другими операциями.

Spinelli R. и др. [2] исследовали влияние сопротивления пачки при прохождении пней, разгрузке, подъеме пачки и др. Установлено, что данные сопротивления могут вызывать резкие скачки усилий в несущем канате порядка 40–70 кН.

Исследования усилия в несущем канате с последующим использованием полученных результатов при моделировании аналогичного нагружения в компьютерных пакетах SkylineXL и ANSYS [3] позволило достичь минимальной погрешности в 7,24%. Однако аналогичных исследований для тягового каната выполнено не было.

Белая Н. М. исследовала влияние процесса заготовки древесины воздушно-трелевочными

установками на усилия в тяговом и несущем канатах. Установлено, что наибольшие усилия в тяговом канате возникают в начальный период времени при подтрелевке [8, 9].

Алышевым И. Ф. были выведены эмпирические зависимости (линейные и квадратичные) коэффициента сопротивления (трения скольжения) [10] в зависимости от породы и способа трелевки. Наименьшее значение коэффициента приходилось на трелевку хлыстов без сучьев – 0,38–0,41, при трелевке пачек с сучьями максимальные значения достигали 1,3–1,6.

Коротяевым Л. В. [11] проведена обширная работа по определению сопротивлений, возникающих при трелевке, однако не было уделено сосредоточенного внимания непосредственно самым опасным и нестабильным режимам работы – при преодолении предметом труда пней.

Журавлев Н. А. [12] установил, что частота колебания усилий в тяговом канате при трелевке пачки в полуподвесном положении при скорости 2 м/с находится в диапазоне 0,26–0,39 с и отметил, что при увеличении жесткости каната частота собственных колебаний возрастает.

Всеми авторами был определен автоколебательный характер изменения усилия в тяговом канате [1–3, 5–12].

Основная часть. Методика проведения полевых испытаний по исследованию усилий в тяговом канате мобильной канатной трелевочной установки. Цель экспериментальных исследований – получение достаточного количества опытных данных, характеризующих процесс работы МКТУ в условиях заболоченного лесфонда, и выработка рекомендаций по эффективному освоению труднодоступных лесных территорий. Предмет исследования – усилия в тяговом канате канатной трелевочной установки. Объект исследования – мобильная канатная трелевочная установка МТК-431 и трелевочный трактор ТТР-401 производства Минского тракторного завода. Технические характеристики МТК-431 представлены в таблице.

Технические характеристики МТК-431

Характеристика	Показатель
Базовая машина	БЕЛАРУС 1221, лесная модификация
Мощность двигателя, кВт	90
Характеристика	Показатель
Рабочие канаты	Несущий, тяговый, возвратный
Грузоподъемность, кг	2000
Общая масса, кг	8400
Максимальное расстояние трелевки, м	200
Усилие натяжения несущего каната, кг	5000
Управление	Электрогидравлическое с выносного пульта
Технологическое оборудование	Каретка вытяжная механическая, трелевочная мачта

Общий вид установки и трелевочной каретки представлены на рис. 1.

В соответствии с целью исследования, методика включала следующие этапы:

1) изучение характера изменения усилий в тяговом канате при выполнении трелевки древесины вдоль трелевочного коридора полуподвесным способом;

2) изучение характера изменения усилий в тяговом канате при смене способа перемещения из положения волоком в полуподвесное положение;

3) изучение особенностей взаимодействия хлыста с лобовым препятствием в виде пня и его влияние на усилие в тяговом канате при подтрелевке волоком.

Исследования № 1 и 2 выполнялись на установке МТК-431. Исследование № 3 выполнялось с помощью трелевочного трактора ТТР-401. Исследования усилий в тяговом канате установки МТК-431 и трелевочного трактора ТТР-401 проводились в весенне-летний период.

В процессе проведения исследований по определению усилий в тяговом канате в качестве измерительного оборудования и вспомогательного инструмента использовались:

– восьмиканальный измерительный усилитель Spider 8, служащий для преобразования сигнала от датчиков в цифровой вид (рис. 2, а);

– переносной компьютер (ноутбук), являющийся носителем специализированного программного обеспечения для Spider 8 – Catman, хранилищем полученных экспериментальных

данных и используемый для визуального отображения процесса измерения в реальном времени (рис. 2, а);

– инвертор для преобразования напряжения из 12 в 220 В, необходимого для работы ноутбука и усилителя (рис. 2, а);

– датчик силы НВМ U9B, применяемый для измерения величины силы тяги при трелевке (рис. 2, б).

В качестве вспомогательного инструмента использовались:

– мерная линейка 30 м;

– кабельный удлинитель с четырьмя жилами;

– автомобильный аккумулятор;

При определении усилия в тяговом канате регистрировались сигналы, получаемые от датчика силы НВМ U9B и преобразованные с помощью многоканального измерительного усилителя сигнала НВМ Spider 8, который подключался к ноутбуку с соответствующим программным приложением Catman. Полученные сигналы отображались с шагом в 0,02 с в пакете MS Excel. Для соединения напрямую датчика силы НВМ U9B с измерительным комплексом применялся кабельный удлинитель с четырьмя жилами. Питание измерительного комплекса осуществлялось с помощью автомобильного аккумулятора. Для определения «чистого» тягового усилия (без потерь на трение в блоках, перемещение самого каната), затрачиваемого на перемещение лесоматериалов, датчик силы U9B устанавливался между цепью чокера и замком для цепи, продетым в собирающий канат (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1. Технологическое оборудование МТК-431:

а – каретка; б – мачта



Рис. 2. Измерительное оборудование:
 а – переносной компьютер, восьмиканальный измерительный усилитель Spider 8, аккумулятор, инвертор; б – датчик силы U9B

Измерения параметров хлыстов, а также линейные размеры испытательного участка производились 30-метровой рулеткой.

Исследование лобовых сопротивлений наиболее актуально в условиях заболоченного лесфонда, так как этот аспект является характерным для природно-производственных условий Республики Беларусь. Основным лобовым сопротивлением, значительно влияющим на трудозатраты при трелевке, являются высокие пни на пасеке.

Результаты исследования изменения усилия в тяговом канате при перемещении пачки по трелевочному коридору. Исследования проводились на лесохозяйственной дороге, по которой осуществлялась трелевка пачек лесоматериалов в продольном направлении (рис. 3). Изучался цикл трелевки одного лесоматериала массой 260 кг, для большей чистоты получаемых экспериментальных данных. Расстояние трелевки составило 93 м.

Процесс перемещения бревна был разделен на 5 участков (рис. 4):

А) подъем бревна до упора с кареткой и перемещение вдоль трелевочного коридора;

Б) установившийся режим перемещения пачки;

В) приподнимание пачки перед прохождением опорного башмака; момент прохождения опорного башмака и спадание пачки с него;

Г) подъем на холм высотой 30 см и перемещение по нему;

Д) перемещение по новому следу (где еще не прорезана лесоматериалами колея);

Е) разгрузка пачки.

На участке А происходит рост усилия в тяговом канате до момента сдвига лежащей пачки (до преодоления силы трения покоя).

После этого на участке Б (рис. 4) наступает установившийся режим движения, вид графика значений усилия в канате свидетельствует об автоколебательном характере движения лесоматериала. Данный участок наблюдается большую часть пути трелевки бревна и несколько раз за весь цикл, пачка движется по наезженной колее, живой напочвенный покров снят.



Рис. 3. Процесс перемещения бревна массой 260 кг по трелевочному коридору длиной 93 м:
 а – запасовка канатов в каретке;
 б – беспрепятственное движение вдоль трелевочного коридора

При прохождении кареткой промежуточной опоры (участок В) возникает резкий скачок усилия в тяговом канате. Данный скачок по времени был равен шагу измерения комплекса Spider 8 – 0,1 с (рис. 5, а). Рост усилия составил 50% по отношению к среднему на данном участке. Возможно, данный скачок по времени мог быть еще меньше. Такое резкое изменение могло быть вызвано необходимостью затянуть каретку на желоб опорного башмака (рисунок 5, б) либо, наоборот, вытянуть с желоба. После прохождения опорного башмака бревно снова начинает двигаться в установившемся режиме Б. После этого лесоматериал встречает единичное препятствие в виде земляного возвышения высотой 30 см (участок Г). Особенность участка Д в том, что при перемещении по трелевочному коридору в полуподвесном положении бревно (пачка) не всегда проходит по одному следу. Процесс перемещения по новому пути сопровождается большими сопротивлениями перемещению и большой частотой колебаний.

Процесс опускания пачки сопровождается резким падением усилия в тяговом канате (участок Е).

Дискуссия по исследованию № 1. Характер изменения усилия в тяговом канате подтверждает наличие автоколебаний при перемещении лесоматериалов, аналогично результатам исследований [1, 3, 5–7, 9–11]. По данным выполненных исследований было определено, что наибольшие скачки в значении тягового усилия наблюдаются при срыве пачки с места (преодоление силы трения покоя), когда амплитуда колебания максимального значения соседних пиков принимает очень близкие значения, что связано с одинаковой микроструктурой профиля трассы по всей ее длине (микровозвышенности и микропонижения, одинаковый напочвенный покров и близкая степень его разрушения).

Средняя величина усилия при установившемся режиме работы на вершине пика составляет 80–85% от массы пачки, а среднее значение усилия на данном участке 75–80%.

При выполнении испытаний на установке МТК-431 было зафиксировано два диапазона: движение пачки по «старому» (нарезанная колея) следу (0–50 с, рис. 4) и движение пачки по новому следу (50–60 с, рис. 4). Частота колебания усилия в первом случае составляла 1,9–2,2 с, во втором 1–1,2 с. Амплитуда колебаний значения усилия в тяговом канате при движении по старому и новому следу составила 0,5 и 0,8 кН соответственно.

Выполнение операции трелевки бревна по трелевочному коридору в полуподвешенном положении (бревно прижато к каретке) позволило выявить характерные особенности изменения

усилия в тяговом канате в чистом виде. Вертикальная составляющая усилия присутствует всегда при выполнении канатной транспортировки древесины, однако при работе многопролетных установок существует конкретный цикл ее изменения – при приближении к опорному башмаку она увеличивается, после его преодоления – уменьшается.

Экспериментальные исследования позволили наглядно оценить влияние особенностей трелевочного коридора по зонам:

- трелевочный коридор постоянной высоты, с одинаковым напочвенным покровом и степенью его повреждения;
- опорный башмак;
- земляной холм высотой 30 см;
- проход по новому следу. Полученная частота колебаний усилия в тяговом канате в 2,8–3,3 раза больше, чем в аналогичных исследованиях Журавлева Н. А. [12]. Что в первую очередь связано с различием в скорости трелевки: 0,4 и 2 м/с соответственно.

В отличие от исследований [5–7] не было установлено явного скачка в величине усилия при стопорении. Это может быть связано с достаточно небольшой скоростью подъема, которая, однако, также частично попадает в исследуемый в работе [5] диапазон скоростей. Рост усилия характеризует нарастание тяги для срыва пачки с места с преодолением силы трения покоя (рис. 4, а, зона А, пиковое значение), и дальнейшие колебания усилия в канате находятся в очень близком диапазоне.

Преодоление опорного башмака. Как показало исследование, усилие в тяговом канате при перемещении бревна в полуподвесном положении (бревно прижато к каретке) практически совпадает с массой тела (260 кг – 2551 Н), пиковые значения при автоколебаниях соответствуют этому значению, однако при прохождении опорного башмака динамический коэффициент составил 1,5. В течение 0,1 с усилие снизилось с 2 до 1,08 кН, снова увеличилось до 3,1 кН и снизилось до установившегося значения в 2 кН.

В работе [7] не было зафиксировано скачка усилия в тяговом канате при прохождении опорного башмака. В то же время скачок тягового усилия был отмечен при сцеплении грузового крюка с кареткой. Эта разница может быть обоснована значительным различием в скорости подъема пачки: 2,4 м/с в работе [7] и 0,4 м/с в данном исследовании, а также различием в конструкции установок.

Преодоление холма высотой 30 см. Преодоление незначительной возвышенности сопровождалось увеличением усилия в тяговом канате на 25% по пиковым значениям, что представляет значительную величину.

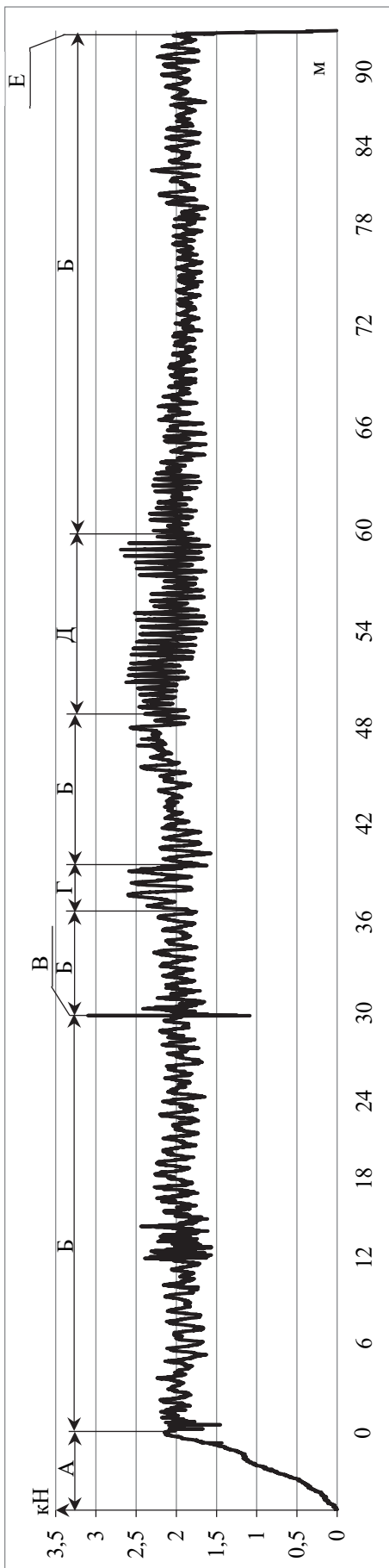
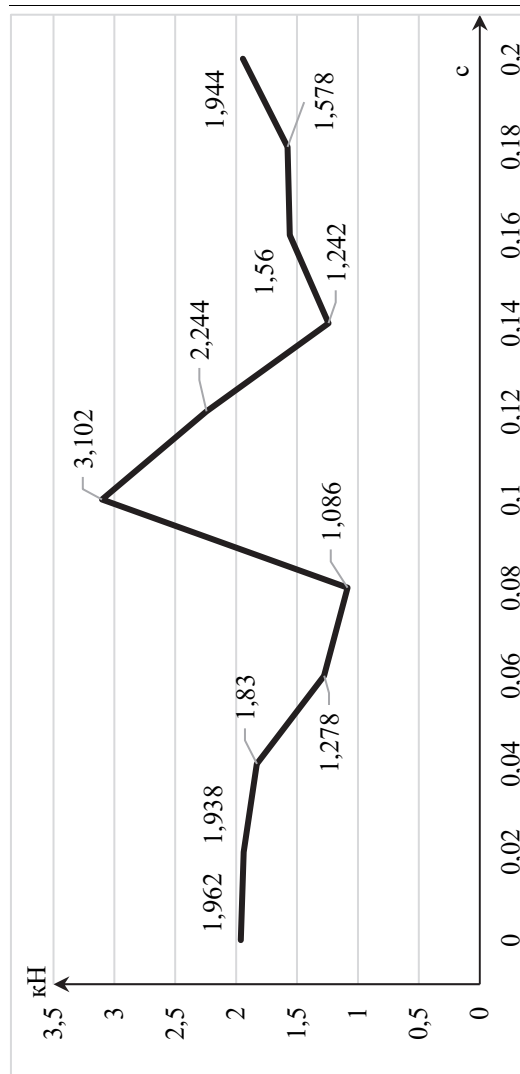


Рис. 4. Перемещение лесоматериала массой 260 кг на расстоянии 93 м



а



б

в

Рис. 5. Прохождение опорного башмака и ситуация на трелевочном коридоре:

а – мгновенное изменение усилия в тяговом канате при прохождении опорного башмака; б – прохождение бревен опорного башмака; в – проездная трелевочная установка



Рис. 6. Исследование усилия в тяговом канате при трелевке двумя способами:
a – волоком; *б* – в полуподвешном положении

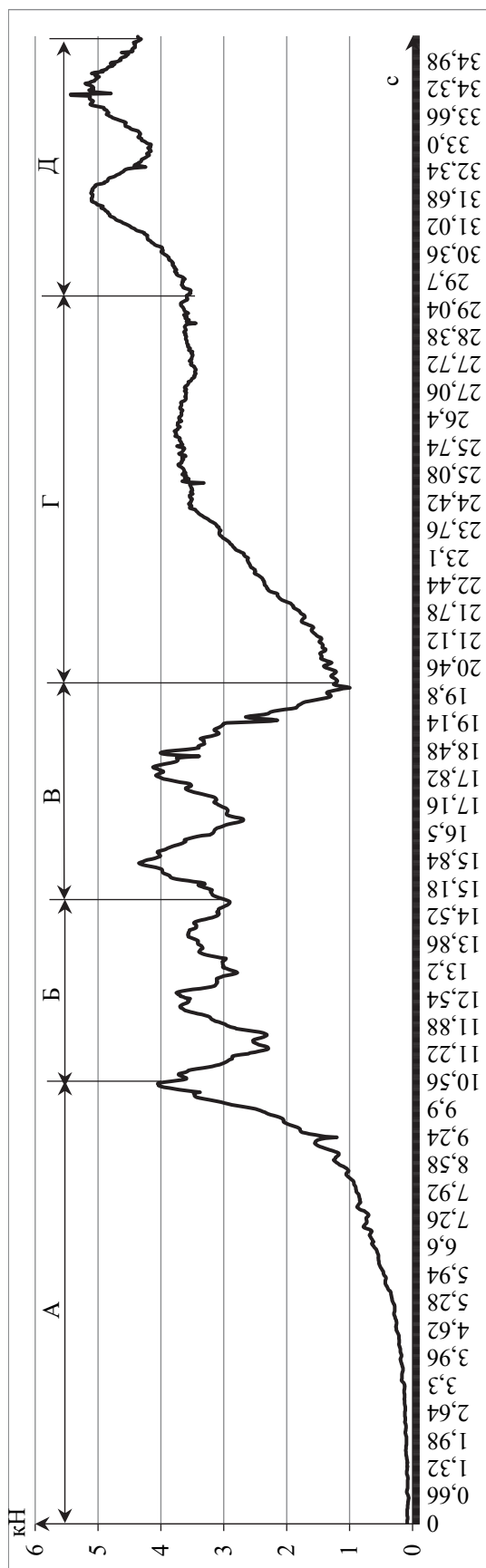


Рис. 7. Трелевка бревна массой 51,5 кг волоком (участки А, Б, В) или в полуподвешном положении (участки Г, Д) на участке длиной 12 м

Проход по новому следу. Как установил Коротяев Л. В. [11], при прохождении пачкой по одному следу сопротивление постепенно уменьшается до определенного значения, а потом незначительно увеличивается по сравнению с минимальным значением. В описанных в данной статье исследованиях не было возможности оценить эту особенность ввиду сложности организации значительной выборки испытаний. При этом выполненные исследования наглядно отражают резкое изменение характера усилия в канате при прохождении пачки по новому следу. Частота колебаний усилия в тяговом канате по сравнению с установившимся движением на участках Б (движение по уже наезженному следу) увеличилась и период колебаний уменьшился с 2 до 1 с. Это привело к увеличению количества циклов нагрузки-разгрузки каната.

2. Сравнение эффективности выполнения трелевки волоком и в полуподвешенном положении. Исследование усилия в тяговом канате при перемещении лесоматериала вдоль несущего каната заключалось в сравнении усилий при трелевке двумя разными способами: волоком и в полуподвешенном положении (рис. 6). Зависимость усилия тяги при перемещении бревна через эти препятствия представлена на рис. 7. Для данного исследования также выделяется несколько характерных участков: А – натяжение тягового каната до момента срыва пачки с места; Б – срыв пачки с места и движение ее волоком без контакта с лежащим бревном; В – движение пачки волоком с трением о лежащее бревно; Г – в начале участка остановка движения, далее подъем бревна до контакта с пачкой без продольного перемещения; Д – продольное перемещение пачки в полуподвешенном положении.

На участке А лесоматериал не перемещается, усилие в канате нарастает по параболе. Данный участок оканчивается максимальным усилием, необходимым для срыва лесоматериала с места. На участке Б бревно перемещается волоком в установившемся режиме, значение усилия в канате изменяется в соответствии с уже определенным автоколебательным характером движения, без касания лежащего бревна (первые 3 пика графика). При появлении трения движущегося волоком бревна о неподвижное начинается участок В, который характеризуется усилиями на 20% большими (пиковые усилия), чем при движении волоком без трения. Далее происходит разгрузка и расслабление каната, после чего бревно подымается снова до контакта с кареткой (участок Г) без продольного перемещения вдоль несущего каната. После этого каретка вместе с бревном перемещалась в продольном направлении в полуподвешенном положении (участок Д). При этом усилие тяги при перемещении бревна в полуподвешенном положении больше усилия волоком на 42%.

Важно отметить, что в данном исследовании термин «трелевка волоком» подразумевал практически беспрепятственное перемещение пачки, что можно видеть из рис. 6, а, б. Единственным видимым сопротивлением перемещению является частичное резание почвы комлевым срезом бревна.

Дискуссия по исследованию № 2. В соответствии с полученными результатами усилие в тяговом канате возможно снизить при выполнении частично полуподвешенной трелевки, т. е. в положении на минимальной высоте от почвы (0,5–1 м), обеспечивающем беспрепятственное прохождение пачки по волоку без зацепов за пни, лежащие части лесоматериалов, ветви, сучья, земляные холмы и т. д. В ряде случаев по усмотрению оператора лебедки возможна трелевка в положении волоком, т. е. в положении, когда пачка перемещается без подъема над поверхностью трелевочного коридора, полностью контактируя по всей длине с почвой. Данный вариант будет особенно эффективен и практичен при сильном затоплении трелевочного коридора (рис. 3.12), так как в данном случае положительный эффект на уменьшение усилия в тяговом канате будет оказывать минимальный коэффициент трения скольжения между древесиной и водой (0,1).

В данном исследовании не было отмечено скачка усилия при стопорении пачки с кареткой (рис. 7, зона Д), как в работах [5–7]: пиковое значение практически идентично последующему значению на соседнем пике. Можно с уверенностью констатировать, что данные скачки усилия характеризуют преодоление силы трения покоя с почвой, а не удар пачки о каретку.

3. Исследование изменения усилия в тяговом канате при подтрелевке. Для изучения характера изменения усилия в описанных выше условиях было выполнено исследование усилия в тяговом канате при прохождении лесоматериалом лобовых препятствий.

Целью данного исследования являлась имитация наиболее опасных ситуаций во время трелевки. Было установлено, что зависимость между тяговым усилием и объемом хлыста незначительная, к тому же было выполнено 7 опытов, результаты которых сведены в график зависимости усилия тяги от объема хлыста (рис. 8).

В ходе проведения экспериментальных наблюдений было выявлено, что существует несколько вариантов встречи лесоматериала с пнем (рис. 9):

- 1) прямой упор с преодолением его вертикально по образующей пня (рис. 9, а, б, в);
- 2) прохождение лесоматериала касательно к образующей пня (рис. 9, г, д, е);
- 3) совмещение 1-го и 2-го вариантов, когда на первоначальном этапе лесоматериал начинает перемещаться по 1-му варианту, но в определенный момент соскакивает и уходит в сторону (рис. 9, ж, з, и).

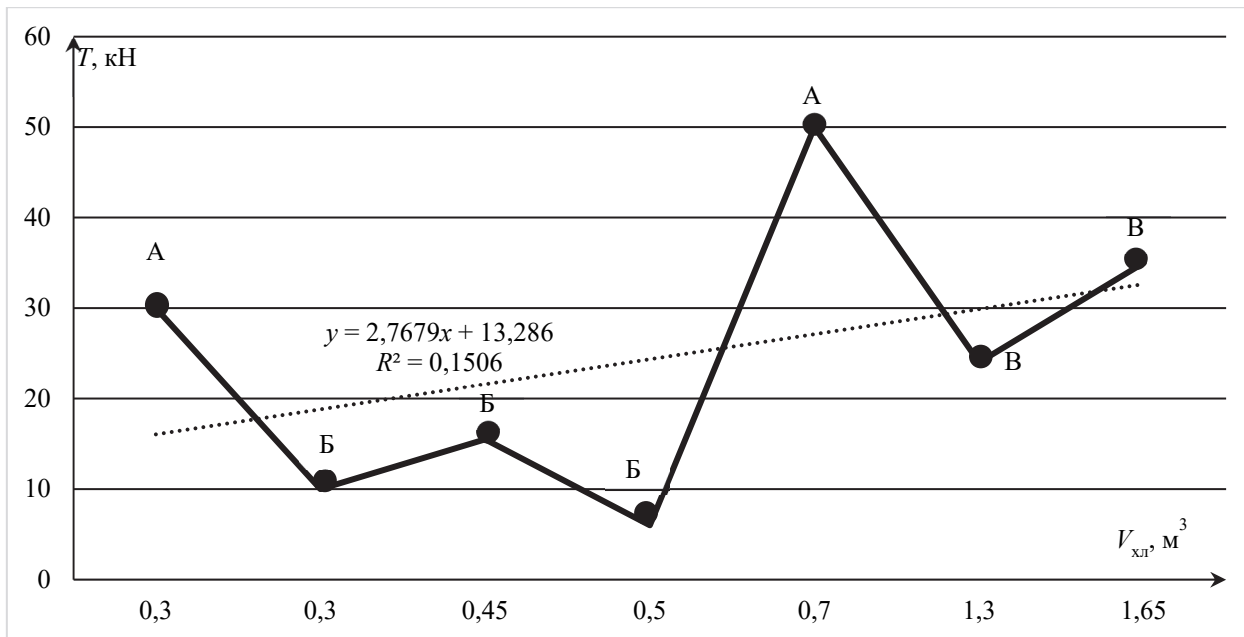


Рис. 8. График зависимости тягового усилия от объема хлыста:
 А – прямой упор; Б – прохождение по образующей; В – совмещение вариантов А и Б

Дискуссия по исследованию № 3. Анализ полученных результатов показал, что именно при преодолении пня по 1-му варианту возникают наибольшие динамические усилия в тяговом органе. Поэтому при выполнении операции подтре-

левки пачки и отдельных хлыстов к несущему канату нужно стремиться к исключению ситуаций встречи с пнем «в лоб», а также минимизировать количество и степень негативного влияния других способов встречи хлыста с пнем.

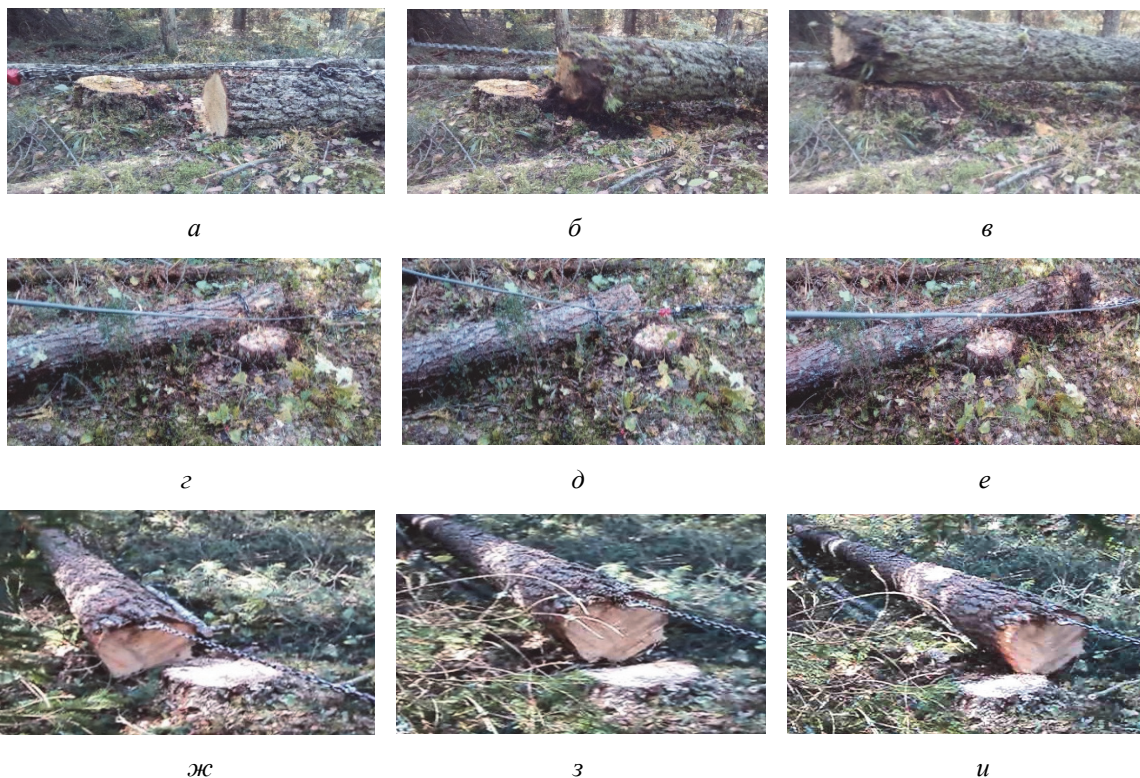


Рис. 9. Варианты встречи лесоматериала с пнем и стадии их преодоления:
 а, б, в – прямой упор с преодолением его вертикально по образующей пня;
 г, д, е – прохождение лесоматериала касательно к образующей пня;
 ж, з, и – комбинированный вариант

Значительно влияние подтрелевки на усилие как в тяговом, так и в несущем канате [1], что необходимо учитывать при проектировании и организации работы канатных установок. Так, подтрелевка пачки массой 1,45 т вызвала усилия в несущем канате, равные 180,3 кН, при монтажном натяжении каната в 100 кН (длина трассы 220 м, расстояние по вертикали между опорами 35 м).

По результатам источника [9], усилие в тяговом канате при подтрелевке с помощью воздушно-трелевочной установки ВТУ-3 не является таким значительным, как в полученных результатах при преодолении пней. Наибольшее значение усилия в тяговом канате, по данным того же источника [9], возникало при стопорении пачки с кареткой, зафиксированное значение которого было в 2 раза больше усилия на подтрелевку и подъем пачки к каретке. Величина усилия на подтрелевку пачки (2,47 т) была меньше массы пачки (3 т). В данном случае отличия в результатах могут быть объяснены различными условиями эксплуатации в горах и в равнинной заболоченной местности.

Полученные значения коэффициента сопротивления частично совпадают с результатами, полученными другими авторами: Альшев – 1,6 [10], Коротяев – 1,7 [11]. Однако верхний порог значений для исследуемой выборки оказался намного выше. Коэффициент сопротивления для хлыста объемом 0,3 м³ (усилие 30 кН) составил при пересчете на массу 12,7. Для объема хлыста 0,7 м³ коэффициент составил 9,1.

Очевидно, для получения полной картины зависимости усилия на преодоление пней необходим больший объем выборки, однако стоит отметить, что в процессе эксперимента по трелевке хлыста объемом 0,7 м³ через пень, в результате усилия, возможно, превышающего порог измерения датчиком (50 кН), был срезан соединительный болт, обеспечивающий соединение проушины датчика и цепи чокара. После этого случая испытания были прекращены из соображения безопасности. Данный факт в полном мере отражает аварийность и травмоопасность операции подтрелевки, особенно на заболоченных лесосеках.

Выводы. Выполненные экспериментальные исследования проводились не на заболоченной лесосеке, а на лесосеке с хорошей несущей способностью. Однако предварительные пробные исследования на заболоченных лесосеках [14] и аналогичный технологический цикл позволяют сделать вывод, что все результаты исследований в данной статье можно достаточно точно использовать для процесса заготовки древесины в условиях сильно увлажненных лесосек.

Трелевка древесины на заболоченной лесосеке сопряжена с образованием колеи, которая нарезается комлями хлыстов. При этом в зависимости от условий сезона заготовки поверхность трелевочного коридора может представлять собой:

а) смесь мокрого песка и воды с примесями частей лесоматериалов и напочвенного покрова летом (рис. 10, а);

б) смесь мокрого песка, воды, частично льда (разломанного и сдвигаемого проходами пачки) с примесями частей лесоматериалов и напочвенного покрова зимой (рис. 10, б);

Известно, что коэффициент трения скольжения древесины по воде и льду значительно меньше [15], чем при перемещении по твердой поверхности, поэтому с уверенностью можно сказать, что характер изменения усилия в тяговом канате при перемещении по трелевочному коридору будет аналогичен рис. 4 с той лишь разницей, что усилие тяги будет меньше.

Амплитуда и частота колебания максимального значения усилия тяги по сравнению с трелевкой по песчаному трелевочному коридору может снижаться за счет того, что нет такой явной силы трения покоя, которая способствует и образованию автоколебаний.

При выполнении подтрелевки для уменьшения сопротивления и снижения аварийности работы необходимо обеспечивать перемещение вершинной части пачки выше уровня лобовых сопротивлений.

Однако важно отметить, что в полной мере исключить зацепы пачки от лобовых сопротивлений, в первую очередь пней, невозможно.



а



б

Рис. 10. Заготовка древесины канатной установкой в различных условиях:
а – летом; б – зимой

Для уменьшения негативного влияния лобовых препятствий на полупасеке следует:

- уменьшать расстояние подтрелевки и расстояние пролета между опорами;
- разрабатывать новые приемы работы и совершенствовать технологии работы установок с неподвижным несущим канатом;
- разрабатывать новые конструкции канатной установки для работы на заболоченных лесосеках с исключением операции подтрелевки.

Для уменьшения усилия при трелевке пачки вдоль трелевочного коридора необходимо обес-

печивать минимальную высоту подъема вершинной части пачки (не более 20 см), что позволит увеличить скорость трелевки и, следовательно, производительность работы.

Обеспечение перемещения пачки по одному следу при движении по трелевочному коридору позволит повысить долговечность тягового каната за счет уменьшения количества циклов нагружения, возникающих в результате автоколебаний. Также уменьшению усилия при трелевке на заболоченных лесосеках способствует наличие водного покрова, который значительно снижает коэффициент трения скольжения.

Список литературы

1. Skyline tension, shock loading, payload and performance for a European cable yarder using two different carriage types / R. Spinelli [et al.] // *European Journal of Forest Research*. 2017. No. 136. P. 161–170.
2. Skyline tension and dynamic loading for cable yarding comparing conventional single-hitch versus horizontal double-hitch suspension carriages / R. Spinelli [et al.] // *International Journal of Forest Engineering*. 2021. No. 32. P. 31–41.
3. Harrill H., Visser R. Skyline tensile force monitoring of mobile tower yarders operating in the Italian Alps // *Future Forests Research Ltd*. 2013. No. 138. P. 847–862.
4. Ходосовский М. В. Исследование проходимости хлыстов при полуподвесной трелевке лебедками: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Минск, 1968. 276 л.
5. Матвеев Э. Н. Динамика подъема и стопорения груза на подвесных канатных лесотранспортных установках: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Львов, 1983. 252 л.
6. Адамовский Н. Г. Оптимальные режимы нагружения несущих канатов подвесных лесотранспортных установок с учетом приведенной жесткости системы: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Львов, 1984. 296 л.
7. Стан Й. Динамические нагрузки в тросах воздушно-трелевочных установок ВТУ-3 при подъеме груза к каретке // *Изв. высш. учебн. заведений. Лесн. журн.* 1965. № 2. С. 22.
8. Белая Н. М. Канатные лесотранспортные установки. М.: Лесная пром-сть, 1967. 299 с.
9. Белая Н. М. Теоретические и экспериментальные исследования стальных канатов подвесных лесотранспортных установок: автореф. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. М., 1967. 42 с.
10. Алышев И. Ф. Исследование сопротивления движению при трелевке лебедками ТЛ-3 полуподвесным способом: автореф. ... канд. техн. наук: 05.21.01. СПб., 1953. 15 с.
11. Коротяев Л. В. Исследование сопротивления движению при трелевке леса: автореф. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Свердловск, 1970. 32 с.
12. Журавлев Н. А. Исследование динамики лебедочных механизмов при тяговых режимах нагружения: автореф. ... канд. техн. наук: 05.06.02. Львов, 1978. 22 с.
13. Удовичький О. М. Обґрунтування основних параметрів та розробка привода мобільної канатної лісотransпортної установки: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.07. Львів, 1999. 236 л.
14. Исследование процесса трелевки хлыстов на заболоченных лесосеках канатными установками в зимний период / А. О. Шошин [и др.] // *Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы 1-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 25–27 апр. 2017 г. Минск, 2017. С. 72–76.*
15. Коэффициент трения скольжения. URL: <http://всеформулы.рф/механика/коэффициент-трения-скольжения/> (дата обращения: 12.01.2022).

References

1. Spinelli R., Marchi E., Visser R., Harrill H., Gallo R., Cambi M., Neri F., Lombardini C., Magagnotti N. Skyline tension, shock loading, payload and performance for a European cable yarder using two different carriage types. *European Journal of Forest Research*, 2017, no. 136, pp. 161–170.
2. Spinelli R., Magagnotti N., Cosola G., Grigolato S., Marchi L., Proto A. R., Labelle E. R., Visser R., Erber G. Skyline tension and dynamic loading for cable yarding comparing conventional single-hitch versus horizontal double-hitch suspension carriages. *International Journal of Forest Engineering*, 2021, no. 32, pp. 31–41.
3. Harrill H., Visser R. Skyline tensile force monitoring of mobile tower yarders operating in the Italian Alps. *Future Forests Research Ltd.*, 2013, no. 138, pp. 847–862.

4. Khodosovsky M. V. *Issledovaniye prokhozimosti khlystov pri polupodvesnoy trelevke lebedkami. Dissertatsia kandidata tekhnicheskikh nauk* [Research stems patency at high lead yarding winches. Dissertation PhD (Engineering)]. Minsk, 1968. 276 p. (In Russian).
5. Matveev E. N. *Dinamika pod'yema i stoporeniya gruzha na podvesnykh kanatnykh lesotransportnykh ustanovkakh. Dissertatsia kandidata tekhnicheskikh nauk* [Dynamics lifting and locking the load on pendant rope highlead yarders. Dissertation PhD (Engineering)]. Lvov, 1983. 252 p. (In Russian).
6. Adamovskiy N. G. *Optimal'nyye rezhimy nagruzheniya nesushchikh kanatov podvesnykh lesotransportnykh ustanovok s uchetom privedennoy zhestkosti sistemy. Dissertatsia kandidata tekhnicheskikh nauk* [Optimal loading regimes carrying ropes suspended lesotrans tailors installations taking into account the reduced stiffness of the system. Dissertation PhD (Engineering)]. Lvov, 1984. 296 p. (In Russian).
7. Stan I. Dynamic loads in the ropes of VTU-3 air-skidders when lifting the load to the carriage. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal* [News of higher educational institutions. Forest Journal], 1965, no. 2, p. 22 (In Russian).
8. Belaya N. M. *Kanatnyye lesotransportnye ustanovki* [Cable yarding systems]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1967. 299 p. (In Russian).
9. Belaya N. M. *Teoreticheskiye i eksperimental'nyye issledovaniya stalnykh kanatov podvesnykh lesotransportnykh ustanovok. Avtoreferat dissertatsii doktora tekhnicheskikh nauk* [Theoretical and experimental investigation of steel ropes suspended highlead yarders. Abstract of thesis PhD (Engineering)]; Moscow, 1967. 42 p. (In Russian).
10. Alyshev I. F. *Issledovaniye soprotivleniya dvizheniyu pri trelevke lebedkami TL-3 polupodvesnym sposobom. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Resistance movement study yarding winch TL-3 semi-overhead way. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. St. Petersburg, 1953. 15 p. (In Russian).
11. Korotyaev L. V. *Issledovaniye soprotivleniya dvizheniyu pri trelevke lesa. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Study of the resistance movement at the timber yarding. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Sverdlovsk, 1970. 32 p. (In Russian).
12. Zhuravlev N. A. *Issledovaniye dinamiki lebedochnykh mekhanizmov pri tyagovykh rezhimakh nagruzheniya. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Investigation of the dynamics of winch mechanisms under traction loading conditions. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Lviv, 1978. 22 p. (In Russian).
13. Udovitskiy O. M. *Obgruntovannya osnovnykh parametriv ta rozrobka pryvoda mobil'noi kanatnoi lisotransportnoi ustanovki. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Substantiation of the main parameters and development of the drive of the cable yarding system. Dissertation PhD (Engineering)]. Lviv, 1999. 236 p. (In Ukrainian).
14. Shoshyn A. O., Protas P. A., Mokhov S. P., Grechko V. V. Study of the cable crane tree-skidding process on swampy logging sites in the winter season. *Lesozagotovitel'noye proizvodstvo: problemy i resheniya: materialy 1-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Logging industry: problems and solutions: materials of International scientific-technical conference]. Minsk, 2017, pp. 72–76 (In Russian).
15. Sliding friction coefficient. Available at: <http://всеформулы.рф/механика/коэффициент-трения-скольжения/> (accessed 12.01.2022).

Информация об авторе

Шошин Артем Олегович – ассистент кафедры механики и конструирования. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: raul777gol@mail.ru, shoshyn@belstu.by

Information about the author

Shoshyn Artsiom Olegovich – assistant lecturer, the Department of Mechanics and Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: raul777gol@mail.ru, shoshyn@belstu.by

Поступила 14.10.2022

УДК 630*78:630*37

А. С. Панкратович, П. А. Протас

Белорусский государственный технологический университет

АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Стремительное развитие лесного комплекса и его технической оснащенности, увеличение объема заготавливаемой древесины в Республике Беларусь, а также усиление конкуренции на рынке лесоматериалов стали предпосылками необходимости исследования вопросов в области оптимизации транспортных процессов и обеспечения ритмичности лесозаготовительного производства. Транспортно-логистические операции на лесосеке, включающие сбор и погрузку лесоматериалов, их сортировку и трелевку, формирование штабелей на промежуточном складе, являются наиболее трудозатратными в лесозаготовительном производстве. При этом эффективность данных операций во многом определяется оптимальным размещением технологических элементов на лесосеке и их геометрическими параметрами. Одним из путей повышения эффективности освоения лесфонда является решение задачи оптимизации транспортно-логистических операций лесозаготовительного производства, для чего необходимо определить соответствующие критерии и ограничения.

В результате проведенного анализа изучены основные социальные, экономические и технические требования, предъявляемые к критериям оптимизации, определены основные критерии эксплуатационной и экономической эффективности (оптимальное расположение трелевочных волоков, усов и погрузочных пунктов, расстояние трелевки, производительность, удельные капиталовложения и себестоимость), оказывающие наибольшее влияние на транспортно-логистические операции лесозаготовительного производства. Приведены способы и методики их определения и сделаны основные выводы по результатам проведенного анализа.

Ключевые слова: критерии, оптимизация, лесосека, транспортно-логистические операции, требования, эффективность, производительность.

Для цитирования: Панкратович А. С., Протас П. А. Анализ критериев оптимизации транспортно-логистических операций лесозаготовительного производства // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С.133–138. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-14.

A. S. Pankratovich, P. A. Protas

Belarusian State Technological University

ANALYSIS OF CRITERIA FOR OPTIMIZATION OF TRANSPORT AND LOGISTICS OPERATIONS OF LOGGING PRODUCTION

The rapid development of the forest complex and its technical equipment, an increase in the volume of harvested wood in the Republic of Belarus, as well as increased competition in the timber market have become prerequisites for the need to study issues in the field of optimizing transport processes and ensuring the rhythm of logging production. Transport and logistics operations in the cutting area, including the collection and loading of timber, their sorting and skidding, the formation of stacks in an intermediate warehouse are the most labor-intensive in logging production. At the same time, the effectiveness of these operations is largely determined by the optimal placement of technological elements in the cutting area and their geometric parameters. One of the ways to increase the efficiency of the development of the forest fund is to solve the problem of optimizing the transport and logistics operations of logging production, for which it is necessary to determine the appropriate criteria and restrictions.

As a result of the analysis, the main social, economic and technical requirements for optimization criteria were studied, the main criteria of operational and economic efficiency were determined (optimal location of skidding lugs, whiskers and loading points, skidding distance, productivity, specific investments and cost) that have the greatest impact on the transport and logistics operations of logging production. The methods and methods of their determination are given and the main conclusions based on the results of the analysis are made.

Keywords: criteria, optimization, cutting area, transport and logistics operations, requirements, efficiency, productivity.

For citation: Pankratovich A. S., Protas P. A. Analysis of criteria for optimization of transport and logistics operations of logging production. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp.133–138. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-14. (In Russian).

Введение. В настоящее время, лесозаготовительное производство Республики Беларусь стремительными темпами развивается в направлении повышения объемов заготовки древесины машинным способом. С применением систем машин «харвестер – форвардер» заготавливают более 52% от общего объема заготовки по всем видам рубок [1] и наблюдается рост данного показателя. Это связано, прежде всего, с необходимостью повышения производительности труда, эффективности и качества разработки территорий лесного фонда; с обеспечением освоения лесфонда в кратчайшие сроки и ритмичностью поставок сырья потребителям; недостатком рабочих в сельской местности и др.

Однако следует отметить, что даже при обоснованном выборе системы машин для проведения лесозаготовок, но отсутствии надлежащей организации работы эффективность заготовки значительно снижается. Особенно это выражено при выполнении переместительных операций, к которым относятся сбор и погрузка лесоматериалов, их сортировка и трелевка (подвозка), формирование штабелей на промежуточном складе.

Поэтому одним из важнейших аспектов повышения эффективности лесозаготовительной деятельности является качественная организация работы, которая должна основываться на оптимизации выполнения операций, в том числе транспортно-логистических, проводимых непосредственно на лесосеке и промежуточном складе.

Для проведения необходимых оптимизационных расчетов в первую очередь следует иметь показатели для оценки эффективности оптимизируемого объекта или же критерии оптимизации.

Основная часть. Целью исследования является анализ критериев оптимизации транспортно-логистических операций лесозаготовительного производства. В соответствии с целью задачи исследования включают:

- анализ требований к подбору критериев оптимизации транспортно-логистических операций;
- выбор основных критериев оптимизации;
- оценку методов определения выбранных критериев.

При выборе критериев, используемых для решения задачи оптимизации транспортно-логистических операций лесозаготовительного производства, следует учитывать, что каждый

оптимизируемый объект должен соответствовать определенным социальным, экономическим, экологическим и техническим требованиям [2]:

– *социальные* требования заключаются в основном в обеспечении безопасности труда, в улучшении санитарно-гигиенических условий для облегчения труда персонала. Данные требования в настоящее время не имеют какого-либо общего количественного выражения критерия, и соблюдение их осуществляется путем следования различным санитарно-гигиеническим нормам и требованиям техники безопасности;

– *экономические* требования заключаются в необходимости обеспечения экономической целесообразности оптимизируемого объекта, т. е. при внедрении нового оптимизируемого объекта в производство он должен повышать производительность труда при минимальных материальных и трудовых затратах, а в случае же, когда оптимизируемый объект является действующим на предприятии, на данный момент, он должен выполнять заданный объем работ или выпуска продукции с минимально возможными затратами материальных и трудовых ресурсов;

– *экологические* требования учитывают необходимость обеспечения норм воздействия машин и технологий на лесные экосистемы, регламентированных соответствующими ТНПА;

– *технические* требования к оптимизируемому объекту представляют собой использование современных достижений науки и техники при его проектировании и организации работ. Объект должен соответствовать своему назначению, а его технические параметры обеспечивать качественное выполнение требуемых работ и их объемов. Существует большое количество показателей технического совершенства оптимизируемого объекта, что в свою очередь усложняет выбор критериев оптимизации. Если, например, в качестве оптимизируемого объекта рассматривать лесозаготовительную технику, то о ее техническом уровне конструкций могут свидетельствовать: материалоемкость, эксплуатационная надежность и долговечность, коэффициент полезного действия, степень унификации и нормализации, динамические и кинематические показатели и др. А о совершенстве их конструкций можно судить по величине производительности труда за единицу времени, продолжительности рабочего цикла,

удельному расходу материалов, уровню механизации и автоматизации работ, универсальности машин, безопасности и санитарно-гигиеническим условиям труда.

Оптимизировать объект по такому большому количеству критериев не представляется возможным. Поэтому решение задачи оптимизации может выполняться путем выбора единого обобщенного критерия оптимизации; проведения последовательной оптимизации по наиболее важным показателям; проведения оптимизации одновременно по нескольким критериям (многокритериальная оптимизация).

Для решения актуальных задач лесопромышленного производства оптимизации с помощью одного критерия недостаточно, поэтому всегда следует иметь в виду, что оптимизация объектов и процессов и оптимальное управление ими возможны только при использовании **системы критериев путем последовательной оптимизации** с созданием ограничений по величине показателей, не используемых в качестве критериев, или путем проведения многокритериальной оптимизации.

В процессе лесопромышленной деятельности выполняют большой объем транспортно-логистических операций, оказывающих существенное влияние на эффективность лесозаготовительного производства в целом. При этом для статистической оценки данных операций необходимо учитывать временные параметры (продолжительность циклов, простоев), параметры эксплуатационных условий (таксационные, грунтовые и др.) и технико-экономические параметры (производительность, удельная себестоимость и др.).

Для повышения эффективности переместительных операций необходимо соответствовать многим требованиям и ограничениям как в плане технологии работы самой техники, так и в организации размещения транспортно-технологических элементов на лесосеке [3–9].

При разработке лесосек в Республике Беларусь можно отметить несколько типичных вариантов схем размещения трелевочных волоков [10], таких как параллельная, диагональная, радиальная.

Данные варианты являются более предпочтительными в силу того, что они уже опробованы на практике. Для работы форвардеров наиболее широко применяется параллельная схема размещения трелевочных волоков. При этом на лесосеках простой прямоугольной формы размещение волоков не вызывает трудностей. На практике в основном отводят лесосеки неправильной сложной формы ввиду таксационных характеристик и других факторов. Тогда возникают определенные проблемы с

выбором рационального размещения технологических элементов на лесосеке, а также усложняются необходимые расчеты. В таком случае расчет определения **оптимального расположения волоков, усов (подъездных путей) и погрузочных пунктов** основывается на **уменьшении затрат на освоение лесосеки, а также минимизации грузовой работы по трелевке древесины** в соответствии со схемой освоения лесосек (рисунок) [11].

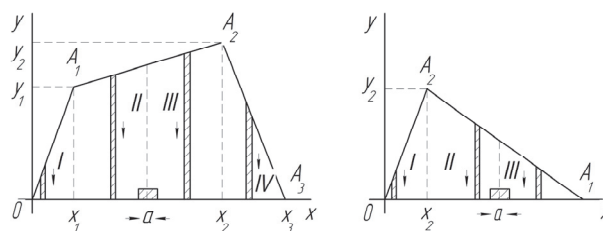


Рис. Схемы освоения лесосек сложной формы

Зависимости для определения места расположения погрузочного пункта на лесосеке с учетом ее геометрии приведены ниже.

1. Когда лесосека имеет форму трапеции, место расположения погрузочного пункта a будет рассчитываться по следующей формуле [11]:

$$a = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{4}, \tag{1}$$

где x_1, x_2, x_3 – координаты вершин соответственно A_1, A_2, A_3 .

2. В случае прямоугольной формы лесосеки

$$a = \frac{x_2}{2}. \tag{2}$$

3. В случае треугольной формы лесосеки

$$a = \begin{cases} x_1 - \sqrt{\frac{x_1(x_1 - x_2)}{2}}, & \text{если } x_2 > \frac{x_1}{2}, \\ x_2, & \text{если } x_2 = \frac{x_1}{2}, \\ 1 - \sqrt{\frac{x_1 x_2}{2}}, & \text{если } x_2 < \frac{x_1}{2}. \end{cases} \tag{3}$$

Оптимальное размещение погрузочного пункта на лесосеке, а также ее нетипичная геометрия оказывают большое влияние на такой показатель, как **расстояние трелевки** $S_{\text{ср}}$, м. Это один из важнейших факторов, влияющих на эффективность лесозаготовительного производства и объем переместительных операций. Уменьшение расстояния трелевки позволит значительно сократить время, затрачиваемое на проведение переместительных операций на лесосеке.

Данный показатель для лесосек стандартной конфигурации в Республике Беларусь обычно рассчитывается по следующей формуле [12]:

$$S_{\text{cp}} = (k_1 a + k_2 b) k_0, \quad (4)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты, зависящие от схемы расположения трелевочных волоков на лесосеке; a – ширина делянки, м; b – длина делянки, м; k_0 – коэффициент удлинения трелевочных волоков, зависящий от рельефа местности (при тракторной трелевке $k_0 = 1,1-1,4$; при трелевке канатными установками $k_0 = 1,05-1,15$).

В случае же когда форма лесосеки имеет более сложную геометрию, можно воспользоваться следующей формулой [12]:

$$S_{\text{cp}} = \frac{2 \sum dR}{abq_0}, \quad (5)$$

где dR – элементарная грузовая работа; q_0 – средний запас древесины на 1 м^2 , м^3 .

Важным критерием эксплуатационной эффективности лесозаготовительной техники, а также совершаемых ею операций является ее **производительность**, или же количество продукции, получаемой либо перемещаемой за единицу времени. Если говорить о производительности как о критерии эффективности оптимизируемого объекта, тогда следует иметь в виду действительную производительность, при расчете которой учитываются потери времени на подготовительно-заключительные операции, отдых оператора, потери по различным организационно-техническим причинам и др. Расчет подобной производительности сильно отличается для разных видов лесозаготовительной техники, но в общем виде ее можно рассчитать по следующей формуле [13]:

$$\Pi = \frac{T \varphi_1 V}{t_{\text{ц}}}, \quad (6)$$

где T – продолжительность работы машины, с; φ_1 – коэффициент использования рабочего времени; V – объем или масса единицы продукции (если производительность определяется по количеству единиц продукции, $V = 1$); $t_{\text{ц}}$ – время, необходимое на обработку или перемещение единицы продукции, с.

В свою очередь, стоит помнить о важности **экономических критериев** при проведении оптимизации. В качестве единого экономического критерия оптимизации объекта может использоваться максимум прибыли, или максимум роста дохода, или же суммарные приве-

денные затраты на создание, содержание и эксплуатацию объекта. Более детально можно использовать системный показатель, который включает в себя **удельные капиталовложения** K , необходимые для осуществления процесса, и **удельную себестоимость** C работ или продукции, получаемых в процессе осуществления данного процесса. В таком случае лучший вариант осуществления переместительных операций выбирается посредством сравнения себестоимости работ C и капиталовложений K для их осуществления. Здесь возможны несколько характерных вариантов.

1. Варианты равноценны: $C_1 = C_2$; $K_1 = K_2$.

2. Второй вариант эффективнее: $C_1 > C_2$; $K_1 > K_2$.

3. Случай, когда для окончательного решения дополнительно необходимо определять окупаемость капитальных вложений: $C_1 > C_2$; $K_1 < K_2$.

В случае же если таких вариантов больше двух, необходимо дополнительно рассчитывать затраты $Z_{\text{п}}$, руб., на проведение работ или получение продукции по следующей формуле:

$$Z_{\text{п}} = C + \Xi_{\text{н}} K, \quad (7)$$

где $\Xi_{\text{н}}$ – отраслевой нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

Заключение. Выполненный анализ критериев оптимизации транспортно-логистических операций лесозаготовительного производства позволил сделать следующие выводы:

– при проведении оптимизации и выборе критериев оптимизации необходимо учитывать их соответствие определенным социальным, экономическим, экологическим и техническим требованиям;

– для решения задачи оптимизации транспортно-логистических операций требуется комплексный подход. В этом случае одного критерия оптимизации не достаточно и более эффективно применять последовательную или многокритериальную оптимизацию;

– в качестве критериев для решения задачи оптимизации транспортно-логистических операций могут использоваться схемы расположения волоков, подъездных путей и погрузочных пунктов, расстояние трелевки, производительность машин, удельные капиталовложения и себестоимость работ;

– для проведения оптимизационных расчетов, приведенных выше, необходимо обладать большим количеством актуальных данных не только об оптимизируемом объекте, но и о предприятии в целом. Эти данные могут быть

получены разными путями из различных нормативно-правовых актов [14–16], регламентирующих проведение лесохозяйственной деятельности, локальной технико-экономической

документации конкретных предприятий, а также с помощью проведения экспериментальных исследований непосредственно на оптимизируемом участке лесного фонда.

Список литературы

1. Заготовка и переработка древесных лесных ресурсов // Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь. URL: <https://mlh.by/our-main-activites/forest/zagotovka-i-ispolzovanie-drevesnykh-lesnykh-resursov> (дата обращения: 14.10.2022).
2. Алябьев В. И. Оптимизация производственных процессов на лесозаготовках. М.: Лесная промышленность, 1977. 232 с.
3. Изотова Е. Н. О факторах повышения эффективности работы на харвестерах и форвардерах // Приоритетные направления развития науки и образования. 2016. № 4-2 (11). С. 67–68.
4. Просужих А. А. Повышение производительности колесных форвардеров обоснованием их параметров и режимов работы: дис. ... канд. техн. наук. Ухта, 2020. 158 л.
5. Федоренчик А. С., Протас П. А., Хотянович А. И. Повышение эффективности эксплуатации системы машин «харвестер – форвардер» // Наука и инновации вузов – производству: взаимодействие, эффективность, перспективы: сб. ст. и тез. науч.-практ. семинара. Минск, 22–23 мая 2007 г. Минск, 2008. С. 78–80.
6. Полукаров М. В. Оценка резервов эксплуатационных затрат систем машин заготовки древесины «харвестер – форвардер» // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов и конкурса по программе «Умник». Екатеринбург, 2017. С. 23–25.
7. Бурмистрова О. Н., Просужих А. А., Рудов С. Е. Экспериментальные исследования производительности форвардера с учетом его эксплуатационных характеристик, параметров лесосеки и физико-механических свойств почвогрунта // Resources and Technology. 2021. Т. 18, № 1. С. 94–124. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5583.
8. Божбов В. Е. Повышение эффективности процесса трелевки путем обоснования рейсовой нагрузки форвардеров. СПб.: С.-Петербург. гос. лесотехн. ун-т им. С. М. Кирова, 2015. 119 с.
9. Кузнецов А. В. Эффективность транспортных операций в сложных природно-производственных условиях // Труды лесинженерного факультета ПетрГУ. 2005. № 6. С. 28–29.
10. Матвейко А. П., Протас П. А. Технология и машины лесосечных работ. Минск: БГТУ, 2008. 116 с.
11. Игнатенко В. В., Турлай И. В., Федоренчик А. С. Моделирование и оптимизация процессов лесозаготовок. Минск: БГТУ, 2004. 180 с.
12. Матвейко А. П., Федоренчик А. С. Технология и машины лесосечных работ. Минск: Технопринт, 2002. 480 с.
13. Матвейко А. П., Клоков Д. В., Протас П. А. Технология и оборудование лесосечных и лесоскладских работ. Минск: БГТУ, 2013. 199 с.
14. Устойчивое лесоуправление и лесопользование. Рубки главного пользования. Требования к технологиям: СТБ 1360-2002. Минск: Госстандарт, 2003. 16 с.
15. Лесной кодекс Республики Беларусь // Национальный правовой интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=Hk1500332> (дата обращения: 14.10.2022).
16. Лесной фонд // Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь. URL: <https://mlh.by/our-main-activites/forestry/forests/> (дата обращения: 14.10.2022).

References

1. Harvesting and processing of wood forest resources. Available at: <https://mlh.by/our-main-activites/forest/zagotovka-i-ispolzovanie-drevesnykh-lesnykh-resursov> (accessed 14.10.2022) (In Russian).
2. Alyab'yev V. I. *Optimizatsiya proizvodstvennykh protsessov na lesozagotvokakh* [Optimization of production processes in logging]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 232 p. (In Russian).
3. Izotova E. N. About the factors of increasing the efficiency of work on harvesters and forwarders. *Prioritetnyye napravleniya razvitiya nauki i obrazovaniya* [Priority directions of development of science and education], 2016, no. 4-2 (11), pp. 67–68 (In Russian).
4. Prosuzhikh A. A. *Povysheniye proizvoditel'nosti kolesnykh forvarderov obosnovaniyem ikh parametrov i rezhimov raboty. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Improving the performance of wheel forwarders by justifying their parameters and operating modes. Dissertation PhD (Engineering)]. Ukhta, 2020. 158 p. (In Russian).

5. Fedorenchik A. S., Protas P. A., Khotyanovich A. I. Improving the operational efficiency of the harvester-forwarder machine system. *Nauka i innovatsii vuzov – proizvodstvu: vzaimodeystviye, effektivnost', perspektivy: sbornik statey i tezisov nauchno-prakticheskogo seminarara* [Science and innovation of universities – production: interaction, efficiency, prospects: a collection of articles and abstracts of a scientific and practical seminar]. Minsk, 2008, pp. 78–80 (In Russian).
6. Polukarov M. V. Estimation of operating cost reserves of harvester – forwarder wood harvesting machine systems. *Nauchnoye tvorchestvo molodezhi – lesnomu kompleksu Rossii: materialy XIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov i konkursa po programme "Umnik"* [Scientific creativity of youth – to the forest complex of Russia: materials of XIII All-Russian scientific and technical conference of students and postgraduates and the competition under the program "Umnik"]. Ekaterinburg, 2017, pp. 23–25 (In Russian).
7. Burmistrova O. N., Prosuzhikh A. A., Rudov S. E. Experimental studies of forwarder performance taking into account its operational characteristics, cutting area parameters, and physical and mechanical properties of the soil. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 94–124. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5583 (In Russian).
8. Bozhbov V. E. *Povysheniye effektivnosti protsessa trelevki putem obosnovaniya reysovoy nagruzki forvarderov* [Improving the efficiency of the skidding process by justifying the flight load of forwarders]. St. Petersburg, St. Petersburg State Forest Technical University Publ., 2015. 119 p. (In Russian).
9. Kuznetsov A. V. Efficiency of transport operations in difficult natural and industrial conditions. *Trudy lesoinzhenernogo fakul'teta PetrGU* [Proceedings of the Forest Engineering Faculty of PetrSU], 2005, no. 6, pp. 28–29 (In Russian).
10. Matveyko A. P., Protas P. A. *Tekhnologiya i mashiny lesosechnykh работ* [Technology and machines of logging operations]. Minsk, BGTU Publ., 2008. 116 p. (In Russian).
11. Ignatenko V. V., Turlai I. V., Fedorenchik A. S. *Modelirovaniye i optimizatsiya protsessov lesozagotovok* [Modeling and optimization of logging processes]. Minsk, BGTU Publ., 2004. 180 p. (In Russian).
12. Matveiko A. P., Fedorenchik A. S. *Tekhnologiya i mashiny lesosechnykh работ* [Technology and machines of logging operations]. Minsk, Technoprint Publ., 2002. 480 p. (In Russian).
13. Matveiko A. P., Klovkov D. V., Protas P. A. *Tekhnologiya i oborudovaniye lesosechnykh i lesoskladskikh работ* [Technology and equipment of logging and timber works]. Minsk, BGTU Publ., 2013. 199 p. (In Russian).
14. STB 1360-2002. Sustainable forest management and forest exploitation. Cabins of the main use. Technology requirements. Minsk, Gosstandart Publ., 2003. 16 p. (In Russian).
15. Forest Code of the Republic of Belarus. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=Hk1500332> (accessed 14.10.2022) (In Russian).
16. Forest Fund. Available at: <https://mlh.by/our-main-activities/forestry/forests/> (accessed 14.10.2022) (In Russian).

Информация об авторах

Панкратович Александр Сергеевич – аспирант кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: halva97@mail.ru

Протас Павел Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: protas77@rambler.ru

Information about the authors

Pankratovich Alexander Sergeevich – PhD student, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: halva97@mail.ru

Protas Pavel Aleksandrovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: protas77@rambler.ru

Поступила 20.10.2022

УДК 630*383.1

М. Т. Насковец, С. В. Красковский, П. Н. Жлобич, А. Н. Четырбок
Белорусский государственный технологический университет

**АНАЛИЗ КОМПОНЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ
ЛЕСНОГО ФОНДА, ОПЫТ УСТРОЙСТВА ПОДЪЕЗДНЫХ
ЛЕСОТРАНСПОРТНЫХ ПУТЕЙ С УПРОЧНЯЮЩИМИ ПРОСЛОЙКАМИ**

В статье с целью формирования оптимальной структуры транспортной сети дорог на территории лесного фонда проанализированы компоненты сложившейся инфраструктуры. Проведенный анализ показал, что в современных условиях базовой составляющей дорожной сети следует считать лесохозяйственные дороги, выполняющие роль магистральных лесных транспортных артерий. Отмечается также, что вторым наиболее важным ее звеном являются различные виды подъездных лесотранспортных путей, в качестве которых выступают многочисленные по протяженности лесные грунтовые дороги и квартальные просеки. Данные виды транспортных путей являются подъездами к лесохозяйственным дорогам и требуют повышения эксплуатационных качеств. В соответствии с этим предложены новые способы их устройства, основная цель которых повышение работоспособности, устраиваемых конструкций посредством применения упрочняющих прослоек. В частности, предложено повышать проезжаемость лесных грунтовых дорог колеинового типа путем укладки в колеи порубочных остатков и поверх них полос сетки стеклянной либо стеклопластика рулонного с последующей отсыпкой песчаного материала покрытия. А при устройстве покрытий на всю ширину проезжей части в них конструктивно дополнительно формируют ограничительные буртики.

Результатом исследований является положительная апробация в условиях производства разработанных конструктивно-технологических решений.

Ключевые слова: транспортная сеть, подъездные лесотранспортные пути, упрочняющие прослойки, опытные участки.

Для цитирования: Насковец М. Т., Красковский С. В., Жлобич П. Н., Четырбок А. Н. Анализ компонентной структуры транспортной сети лесного фонда, опыт устройства подъездных лесотранспортных путей с упрочняющими прослойками // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 139–146. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-15.

M. T. Naskovets, S. V. Kraskovsky, P. N. Zhlobich, A. N. Chetyrbok
Belarusian State Technological University

**ANALYSIS OF THE COMPONENT STRUCTURE OF THE FOREST TRANSPORT
NETWORK FOUNDATION, EXPERIENCE IN THE CONSTRUCTION OF ACCESS
FOREST TRANSPORT ROUTES WITH REINFORCING LAYERS**

In the article, in order to form the optimal structure of the road transport network on the territory of the forest fund, the components of its existing infrastructure are analyzed. The analysis has shown that in modern conditions, the basic component of the road network should be considered forestry roads that perform the role of main forest transport arteries. It is also noted that its second most important link is various types of access forest transport routes, which are numerous forest dirt roads and quarterly glades. These types of transport routes are access roads to forestry roads and require improvement of operational qualities. In accordance with this, new methods of their device are proposed, the main purpose of which is to increase the efficiency of the structures being arranged through the use of reinforcing layers. In particular, it is proposed to increase the drivability of forest dirt roads of the track type by laying logging residues in the tracks and on top of them strips of glass mesh or rolled fiberglass with subsequent pouring of sand coating material. And when laying coverings for the entire width of the roadway, restrictive collars are structurally additionally formed in them.

The result of the research is a positive approbation in the conditions of production of the developed constructive and technological solutions.

Keywords: transport network, access forest transport routes, reinforcing layers, experimental plots.

For citation: Naskovets M. T., Kraskovsky S. V., Zhlobich P. N., Chetyrbok A. N. Analysis of the component structure of the forest transport network foundation, experience in the construction of access forest transport routes with reinforcing layers. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 139–146. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-15 (In Russian).

Введение. В современных условиях развития лесного комплекса значительное внимание уделяется процессу транспортного освоения лесного фонда. И в первую очередь это касается эксплуатационного состояния его дорожно-транспортной сети. Следует отметить, что в большой степени качественное состояние транспортных путей лесных территорий зависит от компонентной структуры и конструктивно-технологических аспектов их устройства [1].

Основная часть. Инфраструктура сложившейся транспортной сети лесного фонда в республике постоянно претерпевает изменения и совершенствуется. Такая тенденция связана с высокой степенью механизации процессов вывозки и поставки древесины, которая предъявляет определенные требования к путям движения разного рода транспортных средств [2–4].

Общепринято, что по территории лесного фонда проходят дороги общего пользования различных категорий (рис. 1), а также на ней существует и функционирует развитая структура дорог отраслевого назначения (рис. 2–4).



Рис. 1. Дорога общего пользования



Рис. 2. Лесохозяйственная дорога

Анализ состава ведомственных дорог лесной отрасли показывает, что базовыми (магистраль-

ными) дорогами являются лесохозяйственные дороги, которые строят в соответствии с проектами, и подъездные лесотранспортные пути к ним.

Как показывает практика, в последние годы ежегодно в республике строится от 100 до 180 км магистральных дорог. Однако с учетом высоких прочностных характеристик их протяженность составляет 50% от требуемого показателя $0,5 \text{ км/км}^2$.



Рис. 3. Лесная грунтовая дорога



Рис. 4. Квартальная просека

Что касается таких транспортных путей, как лесные дороги и квартальные просеки, которые являются нелесными землями лесного фонда, то по своей общей длине они значительно превышают магистральные дороги опорной сети (более 100 тыс. км) [5–8].

Для повышения работоспособности покрытия и снижения его материалоемкости целесообразно применение конструкций с прослойками из геосинтетических материалов, которые в зависимости от назначения позволяют уменьшить объем земляных работ, снизить расход или полностью исключить применение древесины, повысить прочность и долговечность конструкций, увеличить темпы дорожного строительства и межремонтные сроки. На рис. 5 изображен общий вид разработанного дорожного покрытия [9–15].

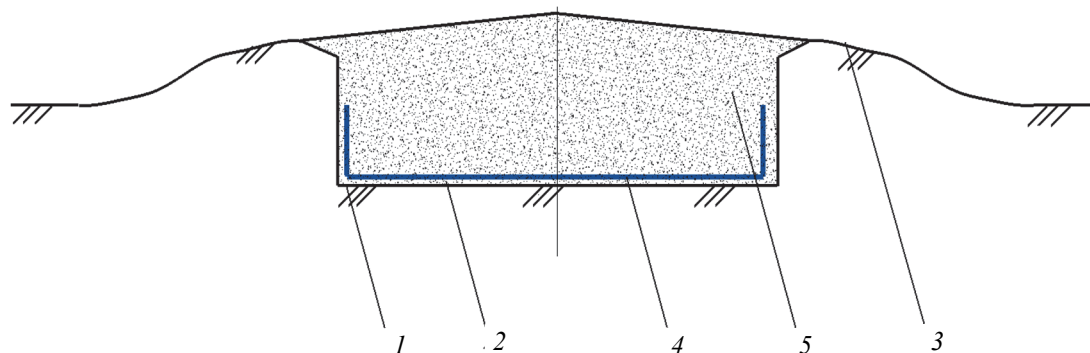


Рис. 5. Общий вид дорожного покрытия

1 – основание; 2 – корыто; 3 – буртик; 4 – геосинтетическая прослойка; 5 – слой покрытия

Предлагаемое дорожное покрытие устраивается следующим способом: в грунтовом основании 1 с помощью клинообразного отвала или посредством любого другого известного способа вырывается корыто 2 с образованием по обеим его сторонам буртиков 3 из грунта основания 1, затем размещается геосинтетическая прослойка 4, после чего с помощью самосвалов отсыпают слой покрытия 5: отсыпaeмый материал слоя покрытия 5 распределяется бульдозером по длине и ширине дороги и уплотняется посредством катков. Описываемый процесс устройства дорожного покрытия изображен на рис. 6.

Внедрение вариантов конструктивного исполнения дорожных одежд на объектах опытного участка проводилось на территории Вязского лесничества государственного опытного лесохозяйственного учреждения «Осиповичский опытный лесхоз». В качестве подъездного лесотранспортного пути к дороге круглогодочного действия для проведения научно-исследовательских работ были выбраны квартальные просеки, проходящие между кварталами 84 и 98, а также 85 и 99 (рис. 7).

Предлагаемые конструкции и способы устройства подъездов к лесохозяйственной магистральной дороге имеют цель производственной

апробации для оценки их работоспособности в процессе организации подвозки сортиментов к основной базовой лесохозяйственной дороге и дальнейшего их складирования. В соответствии с приведенной схемой устройства опытного участка его общая протяженность составляет 500 м. Конструктивно объекты на нем устраиваются поперечного сечения различного вида. Так, первая (1А и 1Б) и вторая (2А и 2Б) конструкции имеют корытообразный профиль по всей ширине просеки, а третья (3А и 3Б) выполнена колеинового типа. При этом индексом А и Б на схеме отмечены виды применяемых геоматериалов (А – геосинтетический материал Тураг и Б – геотекстильный материал «Геобел»).

Для изучения условий эксплуатации лесных автомобильных дорог с целью улучшения работоспособности последних в Полоцком учебно-опытном лесхозе проведено обследование состояния лесотранспортной сети, изучены гидрологические условия местности и выбрана лесная грунтовая дорога в квартале № 122 (выделы 6, 11), на которой предполагалось размещение опытного участка с устройством новых экономичных дорожных конструкций с использованием древесных отходов и стеклопластика рулонного марки «Стеклопластик 250Л».

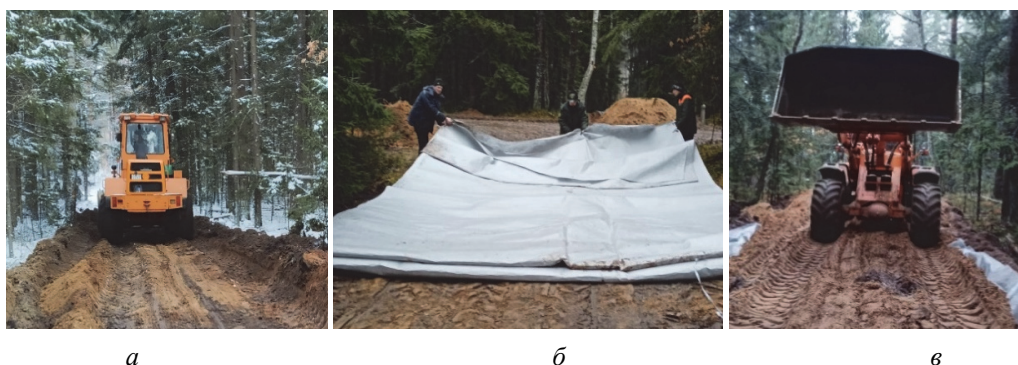


Рис. 6. Процесс устройства дорожного покрытия по всей ширине:

а – формирование корытообразного профиля; б – размещение геосинтетической прослойки; в – отсыпка и распределение материала покрытия

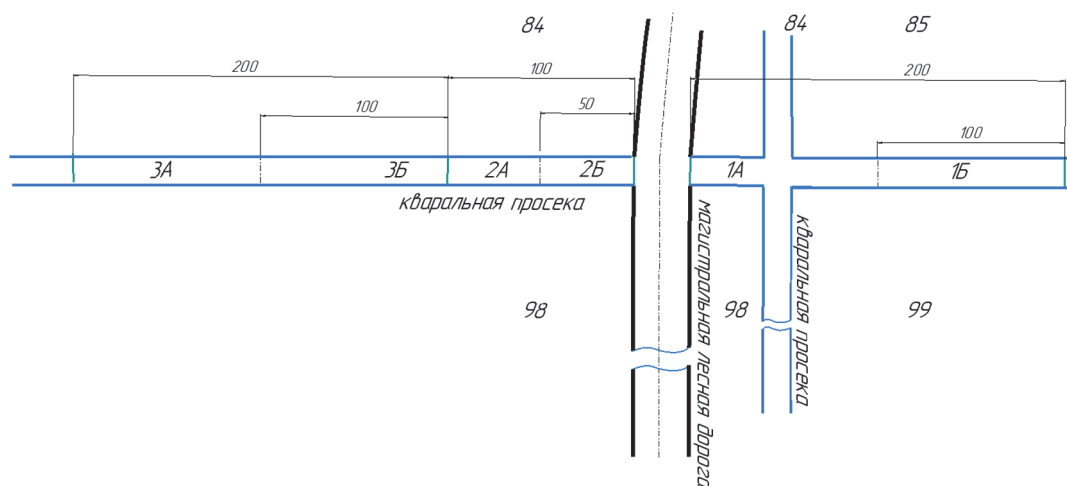


Рис. 7. Структурная схема объектов опытного участка:

1А – объект, устроенный по всей ширине просеки на основе колеяного типа, протяженностью 50 м с геосинтетическим материалом Тураг; 1Б – объект, устроенный по всей ширине просеки на основе колеяного типа, протяженностью 150 м с геотекстильным материалом «Геобел»; 2А – объект, спрофилированный по всей ширине просеки, протяженностью 50 м с геосинтетическим материалом Тураг; 2Б – объект, спрофилированный по всей ширине просеки, протяженностью 50 м с геотекстильным материалом «Геобел»; 3А – объект колеяного типа протяженностью 50 м с геосинтетическим материалом Тураг; 3Б – объект колеяного типа протяженностью 150 м с геотекстильным материалом «Геобел»

Природные условия в квартале № 122 характеризуются плохим водоотводом, местность на отдельных участках переувлажнена. Поверхностный сток в весенний и осенний период не обеспечен, имеется застой воды на поверхности. На рис. 8 показан выбранный участок лесной дороги, на котором предполагается устройство опытных дорожных конструкций и схема расположения трассы опытного участка лесной автомобильной дороги, общая протяженность которой составляет 150 м.



Рис. 8. Место расположения и общий вид опытного участка

Для строительства опытного участка в Полоцком учебно-опытном лесхозе была применена дорожная конструкция из хворостяной выстилки и лент стекловолокна (рис. 9).

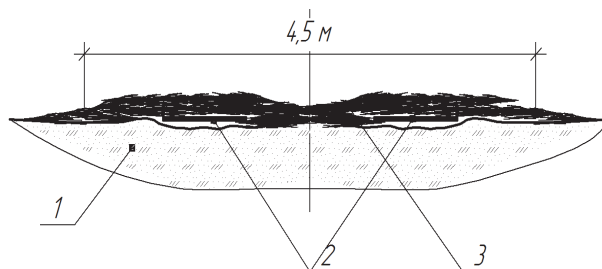


Рис. 9. Общий вид дорожной конструкции:
1 – грунтовое основание; 2 – ленты из стекловолокна; 3 – покрытие из отходов лесозаготовок

Технология устройства опытного участка состоит из нескольких этапов и выглядит следующим образом.

Первый этап: подготовка необходимых материалов для устройства дорожной конструкции, которая включает доставку порубочных остатков на участки, выполнение работ для открытия карьера, закупку и доставку стекловолокна.

Второй этап: укладка порубочных остатков в колею при помощи МЛПТ 5-11 (рис. 10, а).

Третий этап: укладка прослойки из стекловолокна: в одну колею – сетка стеклянная, во вторую – стеклопластик рулонный (рис. 10, б).



Рис. 10. Этапы устройства дорожной конструкции из хворостяной выстилки и лент стекловолкна:

а – укладка порубочных остатков; *б* – укладка упрочняющей прослойки;
в – отсыпка песка; *г* – обустройство дренажных каналов;
д – трамбовка слоев; *е* – окончательное профилирование

Четвертый этап: засыпка песком получившихся слоев толщиной 25–35 см (рис. 10, *в*). При выполнении 4-го и 5-го этапов использовался фронтальный погрузчик «АМКОДОР 342С4», самосвал МАЗ 5550.

Пятый этап: обустройство дренажных каналов (рис. 10, *г*). Используемая техника при выполнении этапа: фронтальный погрузчик «АМКОДОР 342С4», самосвал МАЗ 5550, плуг ПКЛ-70Д в агрегате с трактором МТЗ 892.

Шестой этап: трамбовка слоев виброплитой (рис. 10, *д*). Используемая техника при выполне-

нии этапа: плуг ПКЛ-70Д в агрегате с трактором МТЗ 892, виброплита Honda VM-60/5,5Н.

Седьмой этап: окончательное профилирование (рис. 10, *е*).

Для выполнения технологических операций на опытных участках требуется соответствующий комплекс дорожно-строительной техники и оборудования. Рекомендуемая техника и приспособления, которые доступны предприятиям для выполнения технологических операций по устройству опытных участков, приведены на рис. 11.



Рис. 11. Техника и дополнительное оборудование по устройству опытного участка:
а – самосвал МАЗ 5550; *б* – фронтальный погрузчик «АМКОДОР 342С4»;
в – плуг ПКЛ-70Д в агрегате с трактором МТЗ 892; *г* – виброплита Honda VM-60/5,5Н

Заключение. Таким образом, сформировавшаяся инфраструктура транспортной сети лесного фонда, состоящая из лесохозяйственных дорог, выступающих в качестве магистральных компонентов сети, и подъездных лесотранспортных путей (лесные грунтовые дороги, просеки и иные транспортные коммуникации), является сбалансированной системой лесной отрасли. Однако следует констатировать, что лесохозяйственные дороги требуют

более масштабного увеличения протяженности, а подъездные лесотранспортные пути – улучшения эксплуатационного состояния.

Устройство опытных участков подъездных путей в условиях производства показывает технологичность применения упрочняющих прослоек различного типа при устройстве конструктивных слоев транспортных коммуникаций, которые функционируют на территории лесного фонда.

Список литературы

1. Способ устройства лесной автомобильной однополосной дороги с дорожной одеждой: пат. ВУ 23729 / М. Т. Насковец, П. Н. Жлобич. Оpubл. 16.11.2020.
2. Павлов Ф. А. Покрытия лесных дорог. М.: Лесная пром-сть, 1980. 176 с.
3. Дороги и транспорт лесной промышленности / И. И. Леонович [и др.]; под ред. И. И. Леоновича. Минск: Выш. шк., 1979. 416 с.
4. Сухопутный транспорт леса / В. И. Алябьев [и др.]. М.: Лесная пром-сть, 1990. 416 с.
5. Павлов Ф. А., Мольнар Я. Ф. Транспортные системы, пути и перевозки лесопродукции. В 3 т. Т. 2: Лесовозные дороги. Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2001. 352 с.
6. Вyrко Н. П. Сухопутный транспорт леса. Минск: Выш. шк., 1987. 437 с.
7. Насковец М. Т. Транспортное освоение лесов Беларуси и компоненты лесотранспорта. Минск: БГТУ, 2010. 178 с.
8. Исследование эксплуатационного состояния лесных дорог и разработка рекомендаций по их ремонту и содержанию / Насковец М. Т. [и др.] // Труды БГТУ. 2016. № 2 (184): Лесная и деревооб-раб. пром-сть. С. 65–69.
9. Насковец М. Т. Перспективы использования геосинтетических материалов при ремонте и поддержании конструкций лесных автомобильных дорог // Автомобильные дороги: безопасность и надежность: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–23 нояб. 2018 г. Минск, 2018. С. 154–160.
10. Дини М. Н., Насковец М. Т. Опыт упрочняющих прослоек в конструкциях лесных дорог // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2017. № 48. С. 3–5.
11. Ильин Б. А., Кувалдин Б. И. Проектирование, строительство и эксплуатация лесовозных до-рог. М.: Лесная пром-сть, 1982. 384 с.
12. Насковец М. Т., Жлобич П. Н., Четырбок А. Н. Совершенствование конструкций, техноло-гий устройства и строительства опытных участков автомобильных дорог на лесных территориях с покрытиями низших типов // Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых: ма-териалы VI Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Омск, 10–11 февр. 2022 г. Омск, 2022. С. 295–298.
13. Насковец М. Т., Линкевич А. Ю. Повышение проезжаемости лесных дорог с низкой несущей способностью грунтовых оснований // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 апр. 2017 г. Минск, 2017. С. 77–83.
14. Оруджова О. Н. Влияние гибких геотекстильных прослоек на прочность дорожной кон-струкции // Лесной журнал. 2013. № 4. С. 54–59.
15. Гармаза А. К. Совершенствование конструкций автомобильных лесовозных дорог с приме-нением геотекстилей: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Минск, 2002. 151 л.

References

1. Naskovets M. T., Zhlobich P. N. Method of construction of a forest automobile single-lane road with road clothes. Patent BY 23729, 2020 (In Russian).
2. Pavlov F. A. *Pokrytiya lesnykh dorog* [Covering of forest roads]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 176 p. (In Russian).
3. Leonovich I. I., Matvejko A. P., Chuprakov A. M., Vyrko N. P., Gajduk A. I., Martynihin V. D., Davydulin G. G., Korin G. S., Abramovich K. B., Lyshchik P. A. *Dorogi i transport lesnoy promyshlennosti* [Roads and transport of the forest industry]. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1979. 416 p. (In Russian).
4. Alyabyev V. I., Ilyin B. A., Kuvadin B. I., Grekhov G. F. *Sukhoputnyy transport lesa* [Land transport of the forest]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 416 p. (In Russian).

5. Pavlov F. A., Molnar Ya. F. *Transportnyye sistemy, puti i perevozki lesoproductsii. V 3 tomakh. Tom 2: Lesnyye dorogi* [Transport systems, ways and transportation of forest products. In 3 vol. Vol. 2: Forest roads]. Arkhangelsk, 2001. 352 p. (In Russian).
6. Vyrko N. P. *Sukhoputnyy transport lesa* [Land transport of the forest]. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1987. 437 p. (In Russian).
7. Naskovets M. T. *Transportnoye osvoyeniye lesov Belarusi i komponenty lesotransporta* [Transport development of forests of Belarus and components of forest transport]. Minsk, BSTU Publ., 2010. 178 p. (In Russian).
8. Naskovets M. T. Investigation of the operational condition of forest roads and development of recommendations for their repair and maintenance *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 65–69 (In Russian).
9. Naskovets M. T. Prospects for the use of geosynthetic materials in the repair and maintenance of structures of forest highways. *Avtomobil'nyye dorogi: bezopasnost' i nadezhnost': materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Highways: safety and reliability: materials of International scientific and technical conference]. Minsk, 2018, pp. 154–160 (In Russian).
10. Dini M. N., Naskovets M. T. Experience of hardening layers in the construction of forest roads. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2017, no. 48, pp. 3–5 (In Russian).
11. Plyn B. A., Kuvaldin B. I. *Proyektirovaniye, stroitel'stvo i ekspluatatsiya lesovoznykh dorog* [Design, construction and operation of logging roads]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 384 p. (In Russian).
12. Naskovets M. T., Zhlobich P. N., Chetyrbok A. N. Improvement of structures, technologies for the device and construction of experimental sections of highways in forest areas with lower types of pavements. *Fundamental'nyye i prikladnyye issledovaniya molodykh uchyonykh: materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchoyonykh* [Fundamental and applied research of young scientists: materials of VI international scientific and practical conference students, graduate students and young scientists]. Omsk, 2022, pp. 295–298 (In Russian).
13. Naskovets M. T., Linkevich A. Yu. Increasing the passability of forest roads with low bearing capacity of soil foundations. *Lesozagotovitel'noye proizvodstvo: problemy i resheniya: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Logging production: problems and solutions: materials of the international scientific and technical conference]. Minsk, 2017, pp. 77–83 (in Russian).
14. Orudzhova O. N. Influence of flexible geotextile layers on the strength of the road structure. *Lesnoy zhurnal* [Forest journal], 2013, no. 4, pp. 54–59 (In Russian).
15. Garmaza A. K. *Sovershenstvovaniye konstruksiy avtomobil'nykh lesovoznykh dorog s primeniyem geotekstiley. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Improving the design of automobile logging roads with the use of geotextiles. Dissertation PhD (Engineering)]. Minsk, 2002. 151 p. (In Russian).

Информация об авторах

Насковец Михаил Трофимович – кандидат технических наук, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: naskovets@belstu.by

Красковский Станислав Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной графики, заместитель декана по идеологической и воспитательной работе факультета лесной инженерии, материаловедения и дизайна. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: ttlr@belstu.by

Жлобич Павел Николаевич – инженер кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: pashkazhlobich@gmail.by

Четырбок Антон Николаевич – магистрант кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: setyrbokanton@gmail.com

Information about the authors

Naskovets Mikhail Trofimovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: naskovets@belstu.by

Kraskovsky Stanislav Vladimirovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Engineering Graphics, Deputy Dean for Ideological and Educational Work of the Faculty of Forest Engineering, Materials Science and Design. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ttp@belstu.by

Zhlobich Pavel Nikolaevich – engineer, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., Minsk, 220006, Republic of Belarus). E-mail: pashkazhlobich@ gmail.by

Chetyrbok Anton Nikolaevich – master's degree student, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: cetyrbokanton@gmail.com

Поступила 15.10.2022

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

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ ДЕРЕВЯННЫХ ШПАЛ

Надежность работы деревянных шпал является одним из проблемных вопросов путевого хозяйства, особенно на фоне увеличения доли бесстыкового железнодорожного пути на железобетонных шпалах. Комплексный подход позволяет оценить факторы, влияющие на надежность работы деревянных шпал, как систему показателей обеспечения безопасности движения поездов, а также определить проблемы для дальнейшего изучения работы деревянной шпалы как элемента, оказывающего непосредственное влияние на геометрическое положение рельсовой колеи.

Методами комплексной оценки являются изучение информации о состоянии шпального хозяйства; анализ существующих проблем и поиск методов их решения; анализ нормативно-технических требований к содержанию рельсовой колеи; исследование влияния конструкции пути на надежность его работы с учетом напряжений, вызываемых от подвижного состава; выявление факторов, влияющих на надежность эксплуатации пути с деревянными шпалами.

Комплексный подход помогает выявить наиболее влияющие на техническое состояние рельсовой колеи факторы и определить поиск направлений, которые позволяют повысить надежность работы рельсовой колеи, сделать выводы по прогнозированию и перспективам применения деревянных шпал, а также предложить план дальнейших исследований технического состояния рельсовой колеи для обеспечения ее надежной геометрии.

Ключевые слова: комплексный подход, надежность, факторы, деревянная шпала, напряжения, ширина рельсовой колеи.

Для цитирования: Романенко В. В., Невзорова А. Б. Комплексный подход к оценке факторов, влияющих на надежность работы деревянных шпал // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 147–155. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-16.

V. V. Romanenko¹, A. B. Neuzorova²

¹Belarusian State University of Transport

²Sukhoi State Technical University of Gomel

INTEGRATED APPROACH TO THE ASSESSMENT OF FACTORS AFFECTING THE RELIABILITY OF WOODEN SLEEPERS

The reliability of wooden sleepers is one of the problematic issues of track facilities, especially against the background of an increase in the share of seamless railway track on reinforced concrete sleepers. An integrated approach makes it possible to evaluate the factors affecting the reliability of the operation of wooden sleepers as a system of indicators for ensuring the safety of train traffic, as well as to identify problems for further study of the operation of a wooden sleeper as an element that directly affects the geometric position of the rail gauge.

The methods of integrated assessment are the study of information on the state of the sleeper facilities, the analysis of existing problems and the search for methods for solving these problems, the analysis of regulatory and technical requirements for the maintenance of the railway track, the study of the influence of the track design on the reliability of its operation, taking into account the stresses caused by the rolling stock composition, identification of factors affecting the reliability of operation of the track with wooden sleepers.

An integrated approach made it possible to identify the most influencing factors on the technical condition of the rail gauge and determine the search for areas that would improve the reliability of the rail gauge, draw conclusions on the forecasting and prospects for the use of wooden sleepers, and also propose a plan for further research of the technical condition of the rail gauge to ensure its reliable geometry.

Keywords: integrated approach, reliability, factors, wooden sleeper, stresses, rail gauge width.

For citation: Romanenko V. V., Neuzorova A. B. Integrated approach to the assessment of factors affecting the reliability of wooden sleepers. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 147–155. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-16 (In Russian).

Введение. Взаимодействие пути и подвижного состава – предмет изучения механических процессов, происходящих в железнодорожном пути и в подвижном составе при воздействии их друг на друга. При этом железнодорожный путь и подвижной состав рассматриваются как элементы единой механической системы «колесо – рельс». Исследование данного взаимодействия является основополагающим физическим процессом при движении локомотивов и вагонов по рельсовой колее, так как во многом определяет такие важнейшие показатели, как конструкция верхнего строения пути, ширина рельсовой колеи, нагрузка на ось, статическая нагрузка вагонов, масса и скорость движения составов, а также безопасность движения поездов.

При движении подвижного состава от колес на путь передается силовое воздействие, которое можно разложить на вертикальную и боковую составляющие, характеризующиеся особенностями конструкции ходовых частей подвижного состава и верхнего строения пути (ВСП), планом линии (прямые и кривые), а также уровнем содержания всех элементов системы «колесо – рельс» [1, 2].

Из элементов конструкции ВПС на работу системы влияет не только состояние рельсов (тип, износ, наличие дефектов), но и так называемое «подрельсовое основание», в качестве которого выступают шпалы, переводные и мостовые брусья.

На текущий момент перспективной конструкцией является бесстыковой путь на железобетонных шпалах, однако до полной замены на него в эксплуатации остается звеньевой путь на деревянных шпалах (в зависимости от назначения путей более 30% от развернутой длины).

Целью данных исследований является изучение процесса работы рельсовой колеи для прогнозирования условий надежной работы верхнего строения пути на деревянных шпалах, особенно в криволинейных участках пути малого радиуса.

Основная часть. Белорусская железная дорога (БЖД) по состоянию на 1 января 2022 г. насчитывала 11 719,8 км развернутой длины железнодорожных путей, т. е. длины в однопутном

исчислении. Исходя из назначения путей эта длина распределяется следующим образом: 7227,3 км – главные, 3620,5 км – станционные, 872,0 км – необщего пользования (на территориях предприятий), а также эксплуатируется 12 182 стрелочных перевода [3].

Как отмечалось выше, большее распространение получила конструкция ВСП – бесстыковой путь на железобетонных шпалах, однако на деревянном основании эксплуатируются 133,3 км (1,8% от общей протяженности всех путей) главных и 3620,5 км (33,5%) станционных путей, а также 507,1 км (58,2%) путей необщего пользования.

Главные пути характеризуются самыми высокими скоростями движения поездов (140 км/ч пассажирских и 80 км/ч грузовых) и осевыми нагрузками, поэтому применение деревянных шпал в качестве подрельсового основания не целесообразно ввиду жестких требований к содержанию как рельсовой колеи, так и ВСП в целом.

В зависимости от назначения путей, в которые планируется укладка деревянных шпал, они разделяются на три типа, которые, в свою очередь, различаются размерами (таблица). Толщина шпалы определяет ее жесткость как балки, а длина и ширина – необходимую площадь опоры, способную сопротивляться уgonу пути.

Размеры деревянных шпал

Тип шпалы	Толщина, мм	Ширина верхней постели, мм	Ширина нижней постели, мм	Длина, мм
I	180 ± 5	180	250 ± 5	2750 ± 5
II	160 ± 5	150	230 ± 5	2750 ± 5
III	150 ± 5	140	250 ± 5	2750 ± 5

Размеры верхней постели шпал должны обеспечивать надежную опору под промежуточное скрепление, а именно под металлическую подкладку длиной 290 мм и шириной 160 мм либо соответственно 185 и 76 мм. Такие размеры обусловлены требованиями к надежной работе узла рельсового скрепления при наличии слоя гнили древесины, который ограничивается глубиной от 20 до 40 мм для шпал I типа, от 10 до 30 мм – II типа и от 10 до 20 мм – III типа.

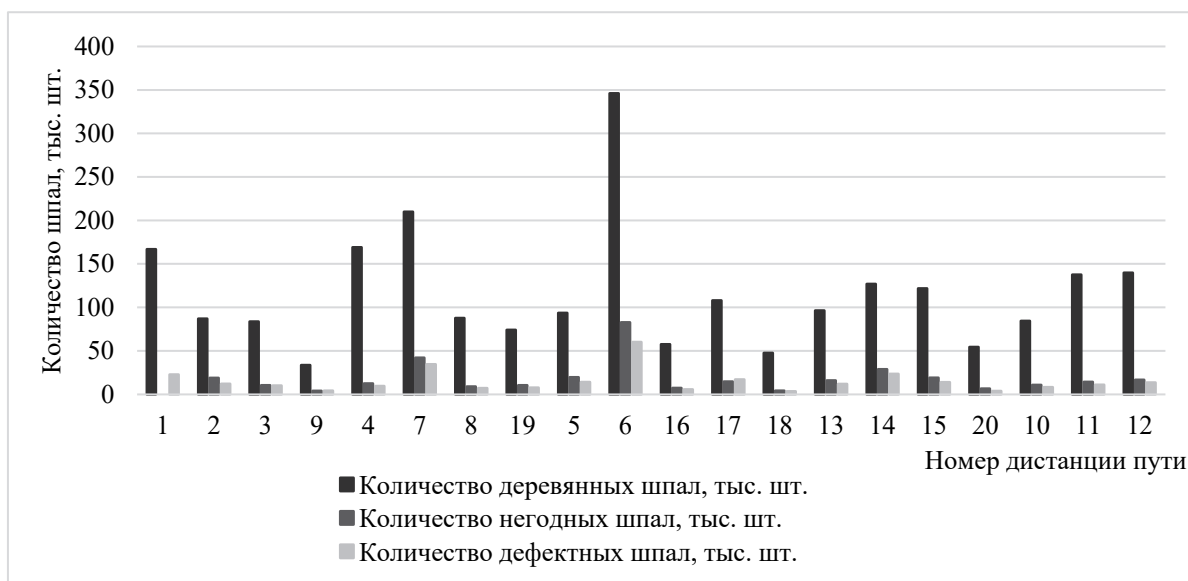


Рис. 1. Наличие и состояние деревянных шпал в дистанциях пути БЖД

Многие исследователи и производственники отмечают, что актуальность эксплуатации деревянных шпал для белорусской и российских железных дорог не уменьшается с течением времени, так как с точки зрения практического применения в ряде случаев именно эти шпалы обеспечивают наиболее оптимальные условия прохождения подвижного состава по рельсовой колее.

Значительная доля путей на деревянном основании объясняется более низкими требованиями для содержания рельсовой колеи на станционных путях, а также особенностями их устройства, к которым можно отнести наличие кривых малых радиусов, уширение ширины колеи, обращение маневровых локомотивов, вызывающих большие поперечные силы, применение гравийного или песчано-гравийного балласта. Существенным ограничением применения деревянных шпал является их недолговременность эксплуатации и быстрое развитие дефектов.

Распределение деревянных шпал по дистанциям пути БЖД (основная организация для обеспечения текущего содержания пути) приведено на рис. 1.

Установлено, что максимальное количество деревянных шпал – 346,1 тыс. шт. и 209,9 тыс. шт., эксплуатируются соответственно на Брестской (ПЧ-6) и Волковысской (ПЧ-7) дистанциях пути, отличительной особенностью которых является не только протяженность большого количества станционных путей, но и наличие путей с совмещенной колеей (рис. 2). Доля максимального количества негодных и дефектных шпал также приходится на эти дистанции.

Оршанская (ПЧ-1) и Барановичская (ПЧ-4) дистанции пути несмотря на то, что главные пути входят во II международный транспортный

коридор (Орша – Минск – Брест), включают узловые станции Барановичи и Орша, которые в свою очередь характеризуются большим количеством станционных путей с кривыми малого радиуса.

В качестве подрельсового основания кроме шпал применяются переводные брусья для стрелочных переводов и мостовые брусья для мостов с ездой на балласте. Таким образом, из 133,3 км общей протяженности главных путей 93,1 км приходится на сами пути, а 6,2 и 34,0 км соответственно на мосты и стрелочные переводы.

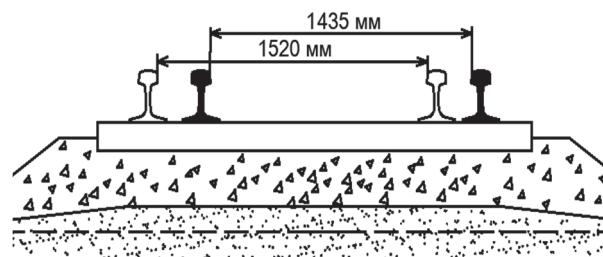


Рис. 2. Поперечный профиль с совмещенной рельсовой колеей на деревянных шпалах

Несмотря на плановую замену стрелочных переводов на деревянных брусьях новыми комплектами на железобетонных, практически половина их эксплуатируется все еще на деревянном основании. Так, например, в 2021 г. при замене 152 комплектов стрелочных переводов 25 шт. были собраны на деревянных брусьях, а также было уложено 476 комплектов новых деревянных брусьев. В настоящий момент эксплуатируемые стрелочные переводы в главных и приемоотправочных путях в объеме 45,3% (2990 комплектов) уложены на деревянном основании, а 54,7% (3607 комплектов) – на железобетонном.

Продление срока службы деревянного основания имеет большое значение для безаварийного движения поездов на БЖД, для этого необходимо выполнять целый комплекс мероприятий и множество требований [4, 5]. Особая роль в этом отводится процессу изготовления, который включает сушку и антисептирование.

Изготовление шпал для нужд БЖД, промышленных предприятий, метрополитена и т. п. происходит на ОАО «Борисовский шпалопродовольный завод», где выпускается около 600 тыс. деревянных шпал и брусьев в год. После серьезной модернизации производства с 2013 г. на заводе введена линия поверхностной наковки шпал и забивки торцевых пластин, которая при обработке изделий из древесины методом «вакуум – давление – вакуум» позволяет обеспечить равномерную пропитку антисептиком всей поверхности [6, 7].

Содержание главных путей является для дороги одной из первостепенных задач, поэтому там в первую очередь назначаются ремонты и выправочные работы с применением высокопроизводительных машин. В зависимости от класса пути (сочетание скоростей движения поездов и грузонапряженности) укладывают либо новые материалы ВСП, либо старогодные, но относящиеся в более высоким группам годности, а также применяют конструкции более высокого технического уровня. Из общей протяженности главных путей 4812,9 км (66,6%) занимает бесстыковой путь, 2414,4 км (33,4%) – звеньевой.

Не вызывает сомнения, что бесстыковой путь обладает рядом преимуществ, способствующих улучшению динамического взаимодействия пути и подвижного состава, уменьшению объемов работ, связанных с отсутствием стыков, повышению плавности и комфортабельности движения поездов и т. п. [8, 9]. Однако к его устройству предъявляются серьезные требования, которые не всегда целесообразно обеспечивать на станционных путях и путях необщего пользования. Ввиду меньшей значимости этих путей рельсовые плети укладываются только в том случае, когда их эксплуатация на путях с более высокими требованиями становится невозможной, поэтому их доля незначительна.

Звеньевой путь на железобетонных шпалах (конструкция ВСП) применяется для 60% станционных и 40% путей необщего пользования.

Железобетонные шпалы укладываются только на щебеночный балласт определенных фракций. Для надежной работы таких шпал необходима хорошая подготовка основания, исключающая их работу на изгиб [10]. Несмотря на изготовление с предварительно напряженной арматурой, их работа на изгиб незначительна и

нарушение правил уплотнения щебня (подбивка в середине) быстро приводит к дефектам (трещины, излом), в итоге дорогостоящий элемент выключается из работы, в то время как для деревянных шпал такой процесс не приводит к критическим состояниям.

Звено рельсошпальной решетки (РШР) на железобетонном основании обладает повышенным весом, так как каждая шпала весит около 250 кг, исходя из чего вес одного 25-метрового звена при рельсах типа Р65 и эюре шпал 1840 шт/км составляет порядка 18 т против 9 т на деревянных шпалах. Из этого следует, что усиливается нагрузка на земляное полотно, кроме того, под железобетонными шпалами толщина щебеночного балласта должна быть на 15% больше, чем под деревянными.

Обеспечение постоянной криволинейности рельсовой колеи в кривых малых радиусов на железобетонных шпалах бывает затруднительно, так как общая жесткость РШР увеличивается. В кривых радиусом менее 350 м необходимо устраивать уширение колеи [11] желателно при конструкции с деревянными шпалами [12].

Для подтверждения этого положения проведем сравнительный анализ содержания криволинейных участков пути на деревянных железобетонных шпалах с обоснованием решения по приведению кривых к положению, удовлетворяющему условиям обеспечения установленной скорости движения поездов на этом участке.

Многими исследователями, изучающими проблемы взаимодействия «колесо – рельс» отмечается, что имеется ряд факторов, влияющих на процесс вписывания подвижного состава в рельсовую колею [13, 14], из которых в первую очередь можно отметить:

- скорость движения поездов;
- тип подвижного состава;
- нагрузку колесной пары на ось;
- радиус кривой;
- ширину колеи.

Под воздействием подвижного состава в пути возникают напряжения, которые постепенно передаются от рельсов на основную площадку земляного полотна (рис. 3). Величины этих напряжений отражают надежность и долговечность всей конструкции [15].

Напряжения определяют расчетом пути на прочность, критериями которой при этом являются допускаемые напряжения:

- в рельсах [σ_r];
- под подкладкой на смятие в деревянных шпалах либо в подкладках или прокладках (в зависимости от типа промежуточного скрепления) на железобетонных шпалах [$\sigma_{ш}$];

- в балласте под шпалой в подрельсовой зоне [σ_6];
- на основной площадке земляного полотна в зависимости от толщины балластного слоя [σ_h].

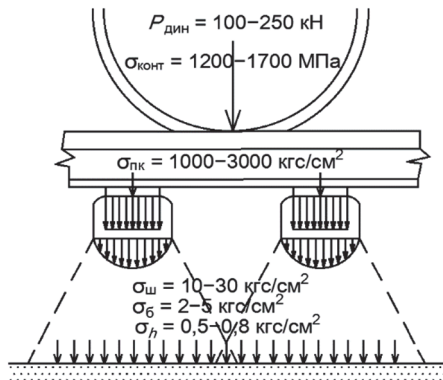


Рис. 3. Схема передачи вертикальной нагрузки колеса на земляное полотно

В расчетной модели рельс рассматривается как балка постоянного сечения на упругих поперечных опорах, которыми являются шпалы, переводные и мостовые брусья. Под действием силы от подвижного состава P рельс изгибается, а ответной реакцией от подрельсового основания является упругий отпор, причем железобетонное основание как более жесткое уступает в упругости деревянному.

Связь между прогибом и отпором определяется через коэффициент пропорциональности, называемый модулем упругости подрельсового основания U и являющийся в расчетах пути на прочность важнейшим параметром [16].

Модуль упругости представляет собой погонный упругий отпор основания, отнесенный к единице прогиба и определяемый экспериментально. В летний период на пути с деревянными шпалами U находится в границах 20–40 МПа, с железобетонными $U = 100–150$ МПа. Зимой из-за промерзания грунта U увеличивается в 1,5–2 и в 1,3–1,5 раза соответственно для деревянных и железобетонных шпал. Из-за того что в кривых радиусом 1200 м и

менее усиливается эпюра шпал, модуль также увеличивается в 1,1 раза.

Для сравнения напряжений и анализа силового воздействия локомотива на путь выполнен расчет пути на прочность на станционном участке железной дороги [17]. Установлено, что наибольшее отрицательное воздействие оказывают маневровые локомотивы, поэтому для расчета выбран тепловоз типа 30–30 серии ЧМЭЗ с осевой нагрузкой до 21,0 тс.

В качестве конструкции ВСП выбраны криволинейные участки радиусами 600, 500, 400, 300 и 200 м на деревянных и железобетонных шпалах, рельсы типа Р65 с приведенным износом 9,0 мм.

Так как величины модуля упругости в летний и зимний периоды разные, значения напряжений в шпалах и балласте также отличаются, причем они больше в зимний период. Величины напряжений в зависимости от скорости движения поездов приведены на рис. 4–7.

Максимальные напряжения из всех элементов ВСП передаются на рельсы, наибольшими значениями из которых являются кромочные в головке в летний период, в то время как остальные напряжения возрастают зимой.

Из-за влияния модуля упругости напряжения в рельсах, уложенных на деревянных шпалах, выше, чем на железобетонных. Допустимое значение напряжений в рельсах 4000 кгс/см². Максимальные значения напряжений составляют 1669 кгс/см² при скорости движения поезда 60 км/ч и 1291 кгс/см² при скорости движения поезда 5 км/ч. Сравнение с допускаемыми значениями означает обеспечение запаса надежности работы рельсов.

Анализ напряжений на рис. 4 показывает превышение напряжений на железобетонных шпалах над деревянными, что объясняется большей жесткостью железобетонного основания.

Разница между напряжениями в железобетонных шпалах летом и зимой с увеличением скорости практически не изменяется, в то время как при деревянных шпалах с увеличением скорости увеличивается и разница.

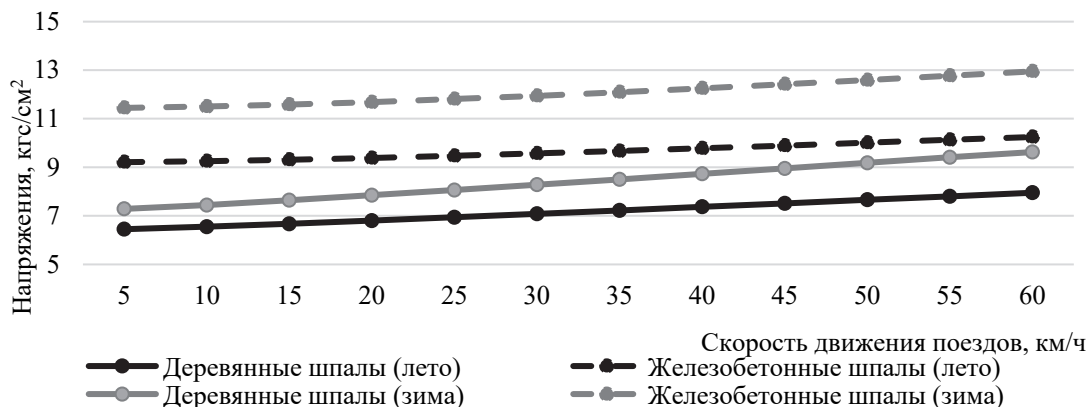
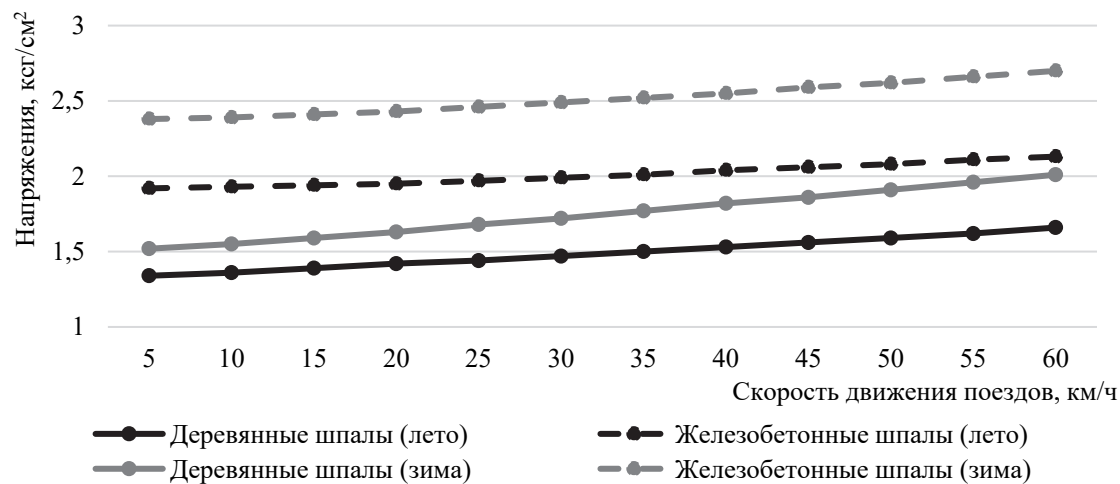


Рис. 4. Напряжения в шпалах под подкладкой $\sigma_{ш}$

Рис. 5. Напряжения в балласте под подошвой шпалы σ_6

Допустимое значение напряжений в шпалах под подкладкой $\sigma = 30 \text{ кгс/см}^2$ не превышает при обеих конструкциях ВСП. Однако большие вес и жесткость железобетонных шпал оказывают более негативное влияние на балласт, чем деревянные шпалы.

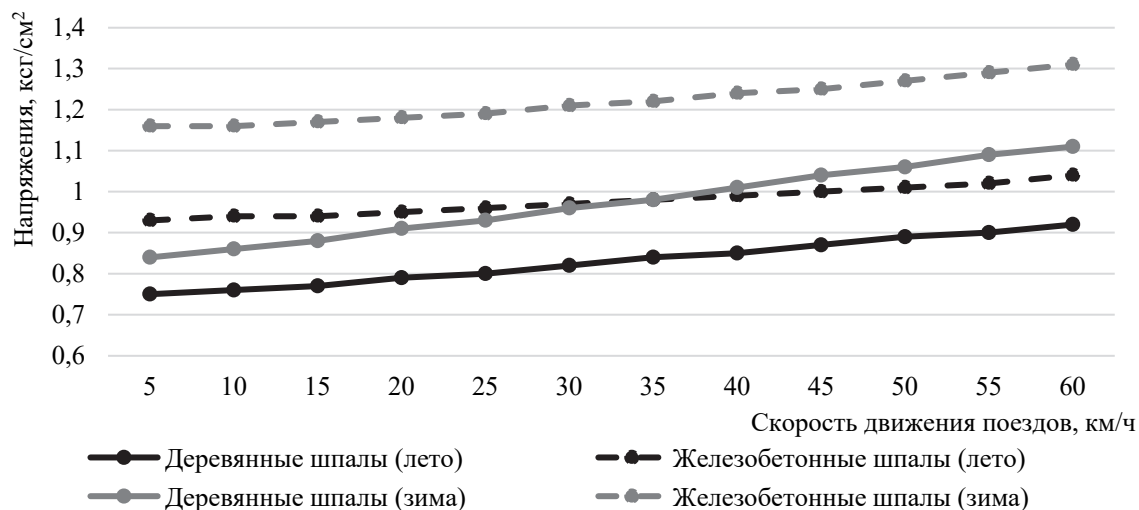
Допустимое значение напряжений в балласте под шпалой $\sigma = 5 \text{ кгс/см}^2$. Из рис. 5 видно, что при всех видах шпал, σ_6 не выходят за границы, однако при железобетонных в летний и зимний периоды они на 30% выше, а следовательно, балласт будет испытывать большее давление.

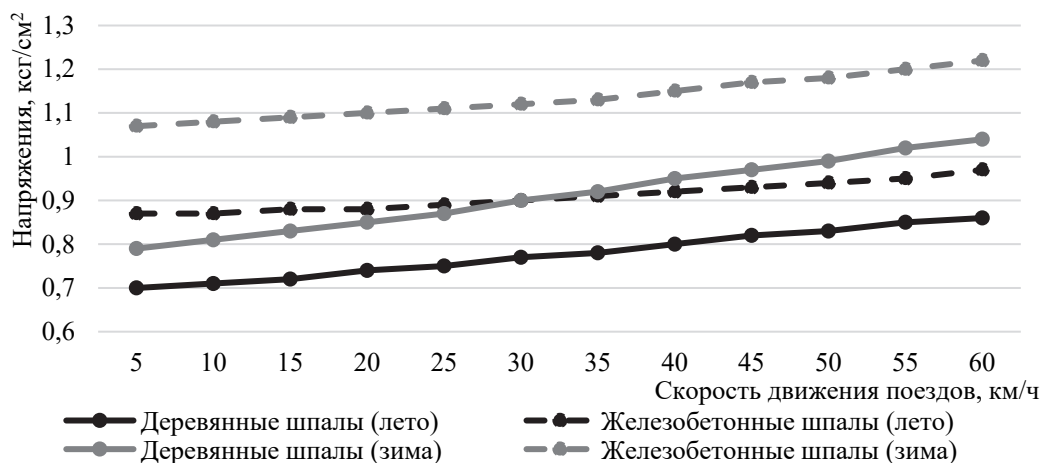
Напряжения в балласте зависят от толщины щебня под шпалой – с увеличением толщины напряжения снижаются. Допустимое значение на основной площадке земляного полотна составляет $0,8 \text{ кгс/см}^2$. Согласно нормативно-техническим требованиям к конструкции железнодорожного пути [18], минимальная толщина балласта под шпалами всех видов для путей 5-го класса должна составлять не менее 20 см.

Из графиков (рис. 6 и 7) видно, что напряжения на основной площадке при деревянных шпалах при скоростях не более 25 км/ч не превышают допуск даже при толщине щебня 10 см. Это позволяет сделать вывод о возможности надежной эксплуатации основной площадки при минимально требуемой толщине балласта.

При минимально требуемой толщине балласта 20 см путь на деревянных шпалах обеспечивает скорости движения до 40 км/ч, в то время как на железобетонных такой толщины щебня недостаточно для реализации движения локомотива даже со скоростью 5 км/ч.

Для снижения напряжений на основной площадке земляного полотна необходимо увеличить толщину щебня под железобетонными шпалами. Анализируя графики, представленные на рис. 6 и 7, возможно предположить, что при увеличении объема балласта конструкция пути на железобетонных шпалах может снизить надежность земляного полотна.

Рис. 6. Напряжения в балласте при толщине щебня под шпалой 10 см σ_n

Рис. 7. Напряжения в балласте при толщине щебня под шпалой 40 см $\sigma_{\text{н}}$

Заключение. Комплексная оценка факторов, основанная на анализе влияния подвижного состава в кривых, позволяет обосновать целесообразность использования деревянных шпал в кривых малого радиуса (меньше 350 м) для обеспечения нормативного уширения колеи пути до 1530 или 1535 мм, что невозможно для железобетонных шпал.

Кроме того, в комплексе с шириной колеи на путях, где не требуется реализовывать высокие скорости движения поездов, применение деревянных шпал позволит за счет уменьшения толщины щебня сократить его объемы. На малоделятельных путях возможно использовать песчано-гравийный балласт.

Комплексный подход оценки факторов, определенных в статье, влияющих на надежность работы деревянных шпал наряду с упругостью, простотой изготовления и крепления рельса, хорошим сцеплением с балластом, возможностью эксплуатации на участках с нестабильным земляным полотном, обозначает преимущество деревянных шпал перед железобетонными.

Исходя из изложенного, можно заключить, что полный отказ от использования де-

ревянных шпал не представляется возможным даже в долгосрочной перспективе. Переустройство конструкции верхнего строения пути на деревянном основании по аналогии с требованиями на железобетонном вызовет значительные финансовые и трудовые расходы, что в настоящее время практически неосуществимо по различным объективным причинам. Кроме того, возможность переустройства кривых на больший радиус существует не на каждой станции.

Комплексный подход позволил выявить наиболее влияющие на техническое состояние рельсовой колеи факторы, одним из которых является радиус кривой, а следовательно, кривизна и отклонения от необходимой кривизны. С учетом того что рельсовая колея в кривой малого радиуса (меньше 350 м) находится в более сложных условиях по сравнению с кривыми большего радиуса, дальнейшие исследования необходимо направить на выявление зависимости влияния кривизны на обеспечение надежной работы рельсовой колеи на деревянных шпалах и формирование методики оценки ее состояния в плане.

Список литературы

1. Карпушенко Н. И., Величко Д. В., Бобовникова Н. А. Влияние ширины колеи и состояния ходовых частей подвижного состава на интенсивность износов в системе «колесо – рельс» и безопасность движения // Вестник СГУПС. 2010. № 22. С. 91–101.
2. Карпушенко Н. И., Величко Д. В., Абрамовский А. М. Оценка состояния пути в кривых по динамическим показателям // Вестник СГУПС. 2010. № 22. С. 43–48.
3. Итоги работы путевого хозяйства в 2021 году и задачи на 2022 год: отчет гос. объединения «Белорусская железная дорога». Минск: Белорус. железная дорога, 2022. 16 с.
4. Божелко И. К., Леонович О. К. Определение долговечности защитных средств для древесины, эксплуатируемой в тяжелых условиях // Труды БГТУ. 2011. № 2: Лесная и деревообаб. пром-сть. С. 200–203. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-dolgovechnosti-zaschitnyh-sredstv-dlya-drevesiny-ekspluatiruemoj-v-tyazhelyh-usloviyah> (дата обращения: 26.02.2021).
5. Чуян С. Н. Продление жизненного цикла деревянных шпал и стрелочных брусьев // Наука и образование – транспорту: сб. науч. статей. Секция 1, Подвижной состав железных дорог и муниципальный пассажирский транспорт. Самара, 2017. № 1. С. 76–79.

6. Анализ технологий шпалопропиточного производства ОАО «Борисовский шпалопропиточный завод» / В. П. Новик [и др.] // Вестник БелГУТ: наука и транспорт. 2021. № 1 (42). С. 65–67.
7. 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 нояб. 2021 г. Гомель, 2021. С. 280–282.
8. Атапин В. В., Ершов В. В. Поперечная устойчивость бесстыкового пути при воздействии поездов // Вестник транспорта Поволжья. 2012. № 6 (36). С. 96–101.
9. Яньшин Д. С. Бесстыковой путь и пример расчета бесстыкового пути на прочность и устойчивость // Научные исследования XXI века. 2021. № 2 (10). С. 165–174.
10. Текущее содержание железнодорожного пути. Технические требования и организация работ: СТП 09150.56.010-2005. Минск: Белорусская железная дорога, 2005. 284 с.
11. Особенности измерения и содержания рельсовой колеи на железобетонных шпалах / В. И. Матвеев [и др.] // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. Наука и прогресс транспорта. 2007. № 17. С. 100–106.
12. 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.
13. Ромен Ю. С. Факторы, обуславливающие процессы взаимодействия в системе колесо – рельс при движении поезда в кривых // Вестник ВНИИЖТ. 2015. № 1. С. 17–26.
14. Евельсон Л. И., Хандыго В. Г. Структурирование информации о системе «колесо – рельс» с помощью технологий экспертных систем // Технические науки – от теории к практике. 2013. № 27. С. 19–24.
15. Ашпиз Е. С. Подход к расчету показателей надежности элементов пути // Мир транспорта. 2011. № 5. С. 33–41.
16. Косенко С. А., Акимов С. С. К вопросу оптимизации жесткости подрельсового основания // Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика: материалы XLI Междунар. науч.-практ. конф., Алматы, 3–4 апр. 2017 г. Алматы, 2017. С. 344–348.
17. Расчеты и проектирование железнодорожного пути / В. В. Виноградов [и др.]. М.: Маршрут, 2003. 486 с.
18. Положение о системе ведения путевого хозяйства Белорусской железной дороги: СТП БЧ 56.388-2022. Минск: Белорусская железная дорога, 2022. 30 с.

References

1. Karpushchenko N. I., Velichko D. V., Bobovnikova N. A. Influence of track width and condition of rolling stock running gear on the intensity of wear in the wheel-rail system and traffic safety. *Vestnik SGUPS* [Bulletin of the Siberian State University of Railways], 2010, no. 22, pp. 91–101 (In Russian).
2. Karpushchenko N. I., Velichko D. V., Abramovsky A. M. Estimation of the state of the path in curves by dynamic indicators. *Vestnik SGUPS* [Bulletin of the Siberian State University of Railways], 2010, no. 22, pp. 43–48 (In Russian).
3. *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).
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-ekspluatiruемой-v-tyazhelyh-usloviyah> (accessed 26.02.2021) (In Russian).
5. Chuyan S. N. Prolongation of the life cycle of wooden sleepers and arrow bars. *Nauka i obrazovaniye – transportu: sbornik nauchnykh statey* [Science and education for transport: collection of scientific articles]. Section 1, Railway Rolling Stock and Municipal Passenger Transport. Samara, 2017, no. 1, pp. 76–79 (In Russian).
6. 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).
7. 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 Mezdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems of transport safety: materials of the XI International scientific and practical conference]. Gomel, 2021, pp. 280–282 (In Russian).

8. Atapin V. V., Ershov V. V. Transverse stability of a jointless track under the influence of trains. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of Transport of the Volga region], 2012, no. 6 (36), pp. 96–101 (In Russian).
9. Yanshin D. S. A jointless path and an example of calculating a jointless path for strength and stability. *Nauchnye issledovaniya XXI veka* [Scientific research of the XXI century], 2021, no. 2 (10), pp. 165–174 (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. 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 natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta. Nauka i progress transporta* [Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport. Science and Progress of Transport], 2007, no. 17, pp. 100–106 (In Russian).
12. 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).
13. Romen Yu. S. Factors determining the processes of interaction in the wheel-rail system when a train is moving in curves. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of the Research Institute of Railway Transport], 2015, no. 1, pp. 17–26 (In Russian).
14. Evelson L. I., Khandygo V. G. Structuring information about the wheel-rail system using expert systems technologies. *Tekhnicheskiye nauki – ot teorii k praktike* [Technical Sciences – from Theory to Practice], 2013, no. 27, pp. 19–24 (In Russian).
15. 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).
16. Kosenko S. A., Akimov S. S. On the issue of optimizing the rigidity of the sub-rail base. *Innovatsionnyye tekhnologii na transporte: obrazovaniye, nauka, praktika: materialy XLI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Innovative Technologies in Transport: Education, Science, practice: materials of the XLI international scientific and practical conference]. Almaty, 2017, pp. 344–348 (In Russian).
17. Vinogradov V. V., Nikonov A. M., Yakovleva T. G., Karpushchenko N. I., Konshin G. G., Ashpis Ye. S., Gasanov A. I., Frolovskiy Yu. K. *Raschety i proyektirovaniye zheleznodorozhnogo puti* [Calculations and design of a railway track]. Moscow, Marshrut Publ., 2003. 486 p. (In Russian).
18. STP BCh 56.388-2022. Regulations on the track management system of the Belarusian Railway. Minsk, Belarusian Railway Publ., 2022. 30 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: aNeuzorova@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

Neuzorova Alla Bronislavovna – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Oil and Gas Development and Hydropneumoautomatics. Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Okiyabrya Ave., 246746, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: aNeuzorova@gstu.by

Поступила 14.10.2022

УДК 004.92:684.7

Л. В. Игнатович, В. О. Куневич, Е. И. Гордиевич
Белорусский государственный технологический университет
**ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МЯГКОЙ МЕБЕЛИ**

Производство мягкой мебели предъявляет повышенные требования к скорости модификации проектов, многократному изменению основных параметров и характеристик на стадии ее проектирования. Применение современных информационных технологий позволяет ускорить принятие проектных решений, оптимизировать и усовершенствовать данный процесс. Специально разработанное программное обеспечение дает представление об изделии, позволяет проработать каждую деталь и делает возможным создание эскизов, по которым в дальнейшем будет производиться мягкая мебель. Новейшие технологии, такие как виртуальная реальность (virtual reality) и 3D-моделирование, все быстрее внедряются в мебельную промышленность.

В данной статье обоснована необходимость применения информационных технологий при проектировании мягкой мебели, рассмотрены программы для 3D-моделирования, описаны преимущества их применения, а также поэтапно рассмотрен процесс создания мягкой мебели (дивана) в 3D Max с последующей его реализацией в виртуальной реальности (VR).

Цель – применение на практике информационных технологий при проектировании мягкой мебели и реализация трехмерных объектов в виртуальной реальности.

В ходе данной работы были сделаны выводы, что трехмерная конфигурация изделий мягкой мебели гораздо сложнее, чем корпусной. Построение 3D-модели может служить для оценки общего вида изделия и его анализа, а последующее применение виртуальной реальности (VR) позволит учесть и установить соответствие изделия мягкой мебели эргономическим и функциональным требованиям.

Ключевые слова: проектирование, мягкая мебель, эргономика, информационные технологии, 3D-моделирование, виртуальная реальность.

Для цитирования: Игнатович Л. В., Куневич В. О., Гордиевич Е. И. Применение информационных технологий при проектировании мягкой мебели // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 156–164. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-17.

L. V. Ignatovich, V. O. Kunevich, E. I. Gordiyevich
Belarusian State Technological University
**APPLICATION OF INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE DESIGN
OF UPHOLSTERED FURNITURE**

The production of upholstered furniture makes high demands on the speed of project modification, multiple changes in the main parameters and characteristics at the design stage. The use of modern information technologies makes it possible to accelerate the adoption of design decisions, optimize and improve this process. Specially developed software gives an idea about the product, allows you to work out every detail and makes it possible to create sketches, according to which upholstered furniture will be produced in the future. The latest technologies, such as virtual reality (virtual reality) and 3D modeling, are increasingly being introduced into the furniture industry.

This article substantiates the need to use information technology in the design of upholstered furniture, considers programs for 3D modeling, describes the advantages of their use, and also considers the process of creating upholstered furniture (sofa) in 3D Max with its subsequent implementation in virtual reality (VR).

The goal is the practical application of information technologies in the design of upholstered furniture and the implementation of three-dimensional objects in virtual reality.

In the course of this work, it was concluded that the three-dimensional configuration of upholstered furniture products is much more complex than the cabinet one. The construction of a 3D model can serve to assess the general appearance of the product and its analysis, and the subsequent use of virtual reality will take into account and establish the compliance of the upholstered furniture product with ergonomic and functional requirements.

Keywords: design, upholstered furniture, ergonomics, information technology, 3D modeling, virtual reality.

For citation: Ignatovich L. V., Kunevich V. O., Gordiyevich E. I. Application of information technologies in the design of upholstered furniture. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 156–164. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-17 (In Russian).

Введение. Информационные технологии занимают все более значимое место в процессе проектирования мебели. Для создания удобной, оригинальной и эстетичной мягкой мебели конструкторам-проектировщикам приходится прикладывать большие усилия, чтобы постоянно совершенствовать и расширять ассортимент конкурентоспособных изделий, разрабатывать новые дизайнерские линии. Существует ряд специально предназначенных программ для проектирования мебели, благодаря которым можно существенно сократить и облегчить процесс создания современных, удобных и практичных предметов мебели, способных не просто дополнить, но и изменить интерьер помещения. Разработанные программы делают возможным проектирование эскизов сложных форм, по которым в дальнейшем будет производиться мебель [1, 2].

При проектировании мебели, в частности мягкой, необходимо учитывать комплекс требований, предъявляемых к ней: социально-экономический, функциональный, производственно-технологический, эргономический, конструктивный и эстетический. В реальной жизни в процессе проектирования, изготовления и оценки мебели исходят из учета всего комплекса требований, которые имеют свою специфику и находят отражение в современных изделиях мебели.

Все эти требования действуют не изолированно, а в тесной связи друг с другом, определяя наиболее рациональную форму мебели с учетом особенностей строения человеческого тела и его физических возможностей, т. е. эргономических требований: антропометрических, физиологических и психофизиологических.

Анализируя перечисленные требования, предъявляемые непосредственно к изделиям мягкой мебели, в первую очередь при проектировании, необходимо основываться на положениях теории эргономики, которая служит базой в процессе размеро- и формообразования мебели с использованием данных антропометрии, физиологии, инженерной психологии.

Учет эргономических требований особенно важен при проектировании изделий, с которыми человек имеет непосредственный длительный контакт, т. е. изделий мебели для сидения и лежания [3].

Эргономика – комплексное понятие, относящееся к организации жизненного пространства в целом. Эргономичная мебель должна быть компактна, удобна, трансформируема и многофункциональна. Всем этим требованиям отвечают модульные мягкие комплекты, которые

подбираются и используются в зависимости от комплекса предъявляемых требований. Понятие «эргономичная мягкая мебель» означает, что данное изделие спроектировано с учетом особенностей строения человеческого тела и его физических возможностей. Диван, который спроектирован и изготовлен с учетом правил эргономики, должен совмещать присущие мягкой мебели характеристики. Прежде всего, он должен быть комфортным, удобным: т. е., вес тела человека (сидя, лежа) должен равномерно распределяться, не создавая больших нагрузок на все участки тела [4, 5].

Человеческий организм – сложная динамическая система. Некорректно спроектированное и изготовленное изделие мягкой мебели, без учета рекомендаций стандартов эргономики, может стать источником стресса и психологического дискомфорта [6].

Основная часть. К информационным технологиям при проектировании мягкой мебели предъявляются большие требования. Прежде чем производить тот или иной вид изделия, необходимо спроектировать, создать его образ. Именно применение данных технологий позволяет визуализировать желаемый объект, до мелочей продумать каждый сантиметр, обнаружить и исправить ошибки, недочеты, упростить процесс проектирования, что окажет в дальнейшем положительное влияние на качество мебели [7].

Новые технологии, такие как виртуальная реальность (VR) и 3D-моделирование, все активнее внедряются на рынок предметов интерьера [8].

Программы для 3D-моделирования достаточно широко используются при проектировании корпусной мебели. В настоящее время специально для мягкой мебели программ нет. Это объясняется тем, что трехмерная конфигурация мягкой мебели гораздо сложнее, чем корпусной. Можно использовать софт-программы – функциональные программы для проектирования мебели, осуществляющие работу по параметрическому принципу и предназначенные для корпусной мебели, а затем конвертировать и конкретизировать их под модель мягкой мебели. При проектировании 3D-модели в процессе создания мягкой мебели в первую очередь необходимо учитывать объем изделия и форму.

Программы для 3D-проектирования располагают всеми необходимыми функциями (развертка объемной поверхности; проектирование сложных форм). Они позволяют менять материал, обивку, цвет, подбирая наилучшее сочетание.

На рис. 1 показан проект дивана, сделанный в программе 3D Max. Прототипом трехмерного объекта, представленного на рисунке, послужил диван «Бэк-2», ЗАО «Холдинговая компания «Пинскдрев».



Рис. 1. Модель дивана в программе 3D Max

Построение 3D-модели дивана может быть выполнено несколько приближенно и поэтому служит лишь для оценки общего вида изделия. Тем не менее с его помощью можно спроектировать объемную модель изделия, например дивана, по реальным размерам [8]. Функция трехмерной визуализации позволяет свободно оперировать объектами, перемещать их в пространстве и обозревать с любого выгодного ракурса [9, 10].

На рис. 2 показан прототип трехмерного объекта – диван «Бэк-2» ЗАО «Холдинговая компания «Пинскдрев» (справа) и модель, сделанная в программе 3D Max (слева).



Рис. 2. Прототип трехмерного объекта: диван «Бэк-2» (справа) и модель, сделанная в программе 3D Max (слева)

Для того чтобы создать эскиз дивана, на первом этапе 3D-проектирования необходимо определиться с его габаритами и размерами, которые прежде всего зависят от конструкции изделия и формы (прямой или угловой). После того как все конструктивные особенности модели определены, размеры изделия просчитаны, можно приступать к трехмерному моделированию объекта.

Для упрощения процесса моделирования необходимо абстрактно разделить диван на составляющие его элементы: каркас, подлокотники, сиденье, спинка, подушки-спинки, ножки.

На рис. 3 показан скриншот интерфейса видового окна с визуализированным трехмерным объектом, на котором отображен пример спроектированного изделия мягкой мебели (дивана), разделенного на составляющие элементы.

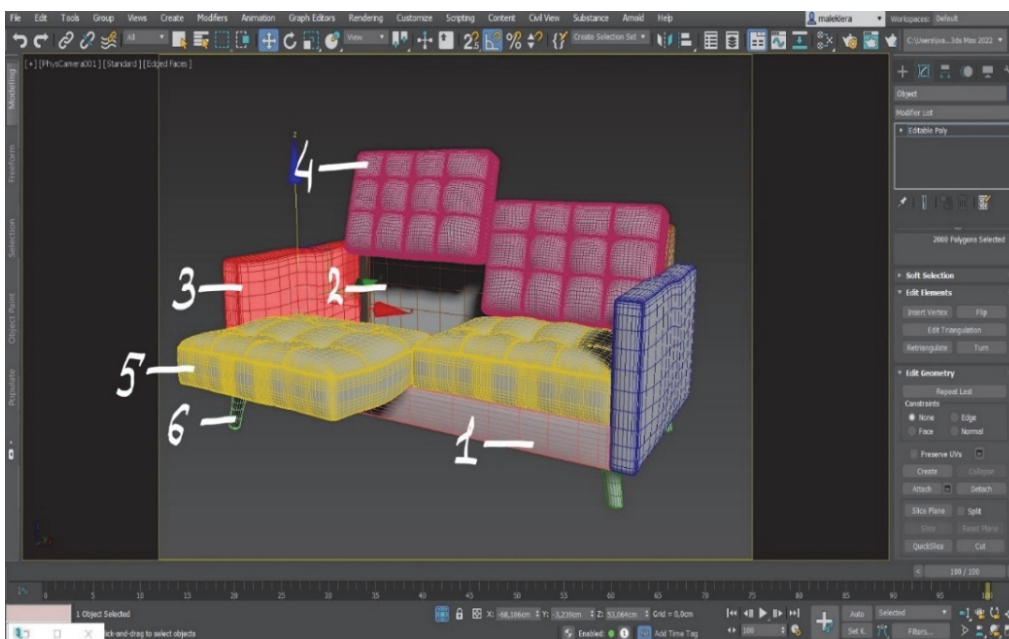


Рис. 3. Скриншот интерфейса видового окна с визуализированным трехмерным объектом: 1 – каркас дивана; 2 – спинка; 3 – подлокотники; 4 – подушки-спинки; 5 – сидения; 6 – ножки

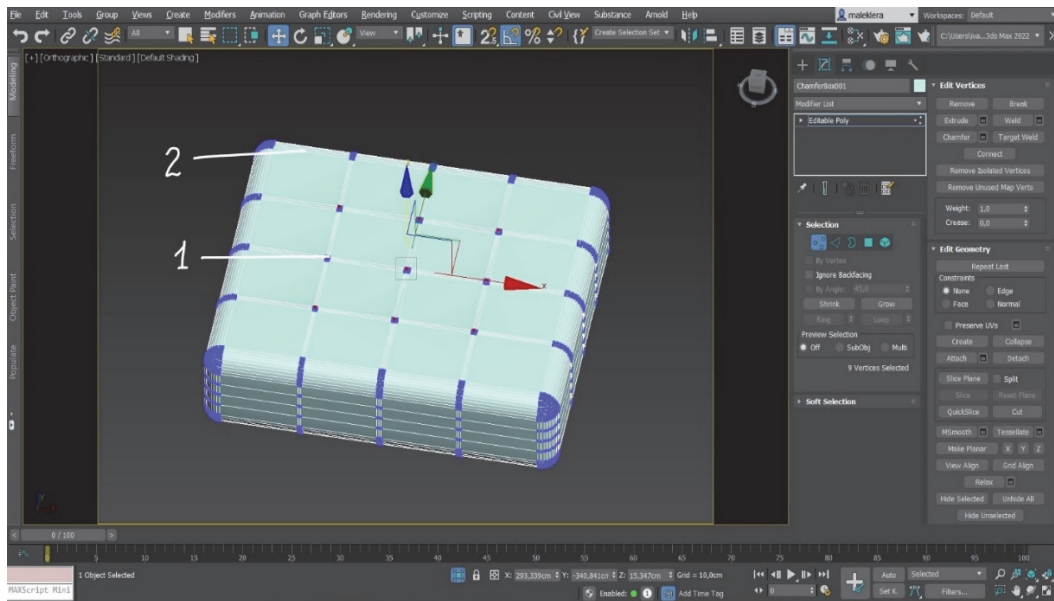


Рис. 4. Скриншот интерфейса командной панели Modify:
1 – «вертексы»; 2 – «эйджи» (ребра)

Первым шагом создания трехмерной модели дивана является проектирование каркаса. С этой целью в интерфейсе программы 3D Max находим вкладку Create, затем – Geometry. В выпадающем меню находим Extended Primitives и выбираем объект ChamferBox.

Второй шаг – моделирование каркаса дивана. Для этого задаются необходимые размеры и величина фаски (скругление граней). Подобным образом создаются и остальные элементы дивана: подлокотники, спинка, сидения и подушки [11].

Для создания имитации пиковки (сплошной прошивки тканого покрытия мебели с закрытием впадин декоративными пуговицами) на

подушках проводится модификация подготовленного ChamferBox. С этой целью объект в Editable Poly конвертируется в трансформируемую модель. Рядом с «вертексами» (контрольными точками) с помощью функции Swift Loop добавляются дополнительные «эйджи» (дополнительные линии на объекте – ребра). На рис. 4 показан скриншот интерфейса командной панели Modify с процессом добавления на объект дополнительных «эйджей».

Следующий этап работы создания мягких элементов – выделение ребер, которые находятся на пересечении со всеми контрольными точками, показан на рис. 5.

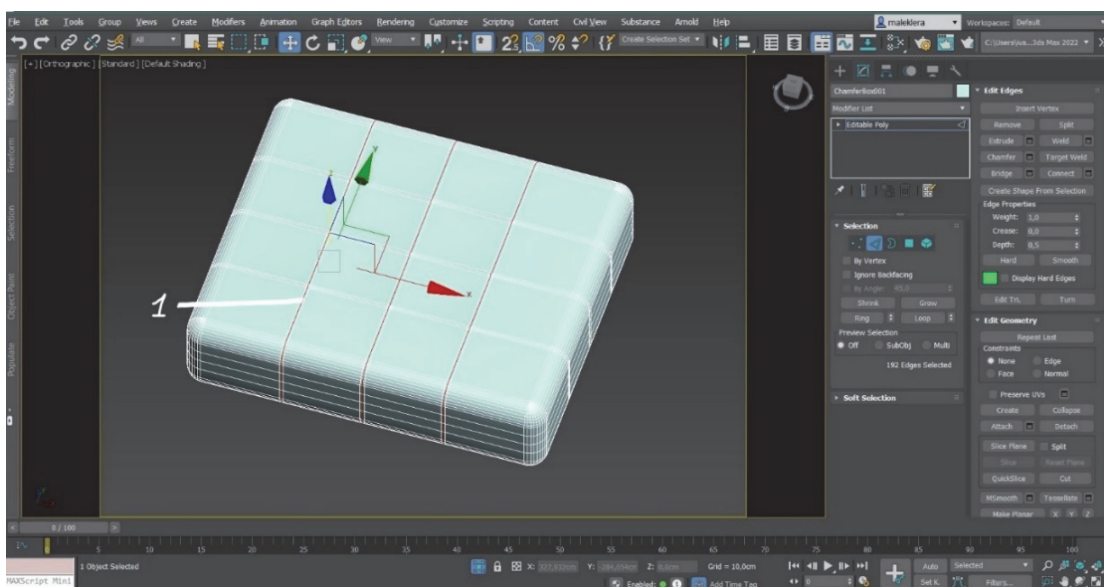


Рис. 5. Скриншот интерфейса проекционного окна:
1 – ребра, пересекающие контрольные точки

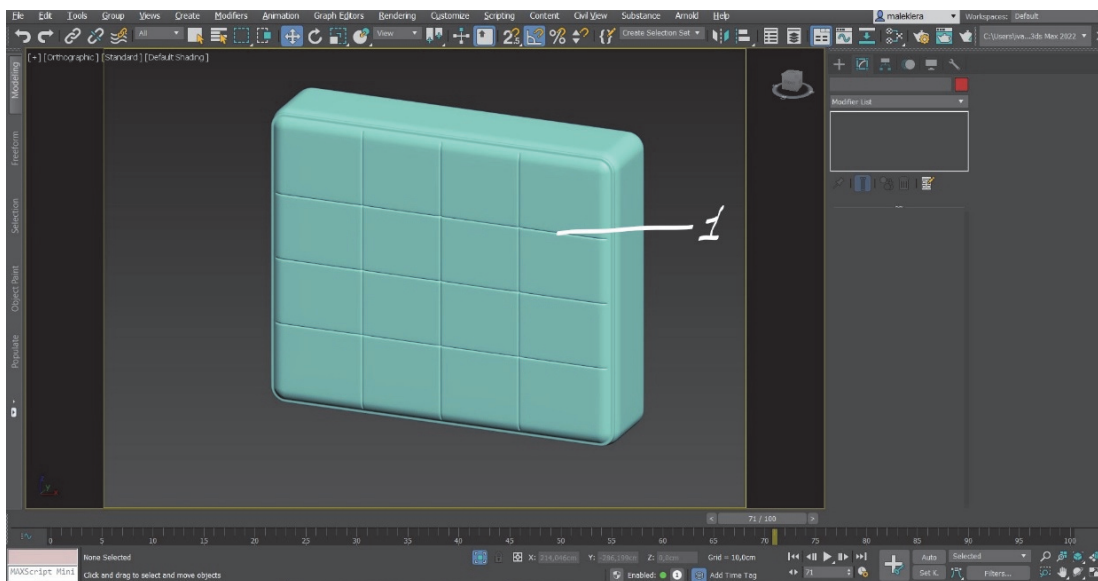


Рис. 6. Скриншот интерфейса проекционного окна с готовой трехмерной моделью подушки:
I – складки на мягком элементе

В качестве заключительного этапа для создания пикетки используется функция Extrude, где методом вдавливания данных ребер создается необходимая драпировка (складки) на мягком элементе, что можно увидеть на рис. 6.

Для создания (моделирования) ножек дивана необходимо во вкладке Create – Geometry выбрать объект Cylinder, перейдя во вкладку Modify, скорректировать форму и угол наклона ножки.

Функционал программного обеспечения для 3D-проектирования благодаря большой па-

литре цветов, которая заложена в данную утилиту, позволяет идеально подобрать цветовые решения для обивки мягкой мебели и тем самым спроектировать изделие в разных вариациях.

Пронализировав материал нашего объекта (дивана), воспроизведем его внешний вид в 3D Max. Для начала работы над подборкой материала в 3D Max запускается редактор Material Editor. На рис. 7 показан скриншот интерфейса редактора материалов Material Editor в 3D Max.

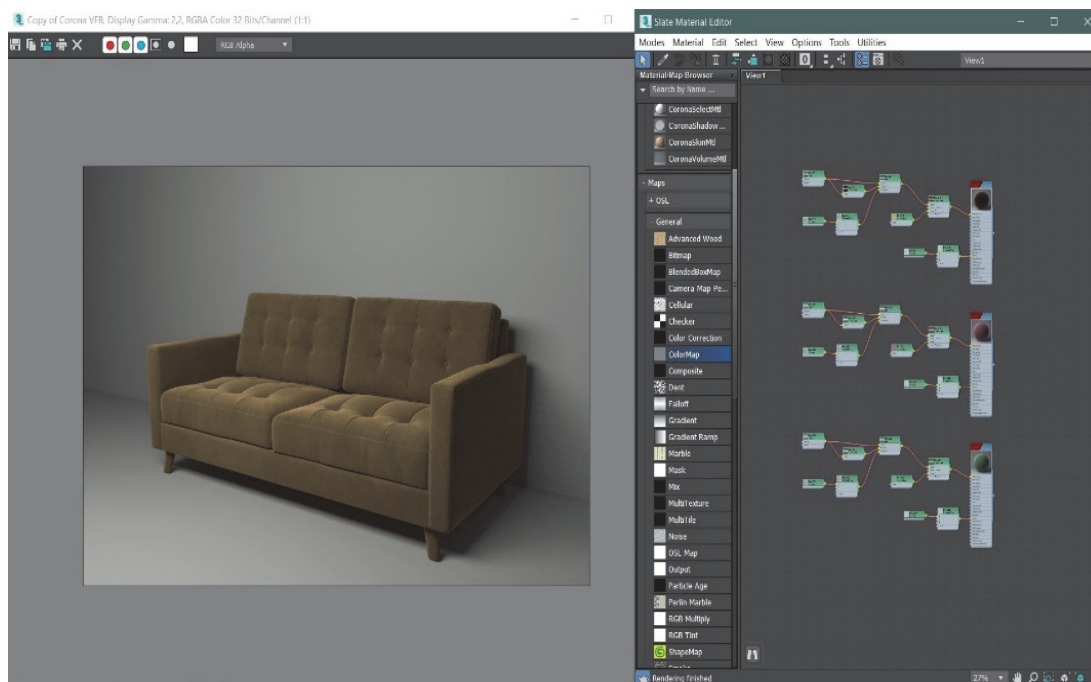


Рис. 7. Скриншот интерфейса редактора материалов Material Editor в 3D Max

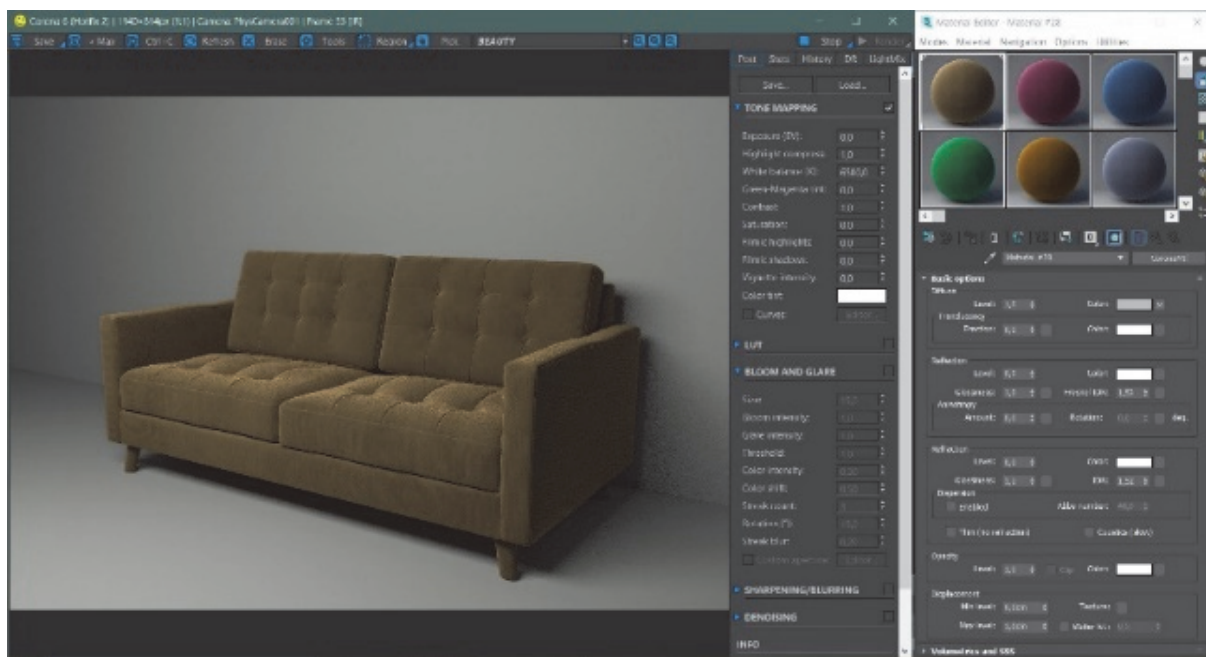


Рис. 8. Скриншот интерфейса Material Editor с готовыми ассетами (цветовая карта материала) материалов

Создается базовая текстура Corona Mtl, к которой поочередно будут добавляться текстурные карты. Текстурные карты – это растровые изображения, генерируемые процедурным путем. Их можно наносить на поверхность объектов или использовать для изменения свойств и цветовой гаммы материала обивки [12].

Например, текстурная карта Falloff имитирует блеск (блик) на материале, карта Bump наделяет материал эффектом шероховатости, неровности, мягкости. Для того чтобы на итоговом материале отобразился и блеск, и шероховатость, необходимо смешать карту Falloff и карту Bump при помощи карты Mix. Чтобы улучшить внешний вид материала в местах его стыков (объединения) применяется дополнительная карта Corona Triplanar, таким образом текстура в местах перехода от одной плоскости к другой будет более плавная. Добавив в слот Diffuse карту Composite, можно изменить цвет получившегося материала. На рис. 8 показан скриншот интерфейса Material Editor с готовыми ассетами (цветовыми картами) материалов.

Как правило, на практике недостаточно смоделировать сцену (виртуальное пространство) с текстурированными объектами – требуется показать объект в определенном ракурсе, для чего необходимы освещение и камера. Удачно расположив камеру, можно добиться того, что сцена станет более реалистичной, информативной и привлекательной [13].

Как правило, заключительной частью работы в 3D Max является создание финального рендера. Часто в компьютерной графике (художественной и технической) под рендерингом

(3D-рендерингом) понимают создание плоской картинки – цифрового растрового изображения – по разработанной 3D-сцене. Синонимом в данном контексте является визуализация [14].

Оценить эргономические свойства или особенности смоделированного трехмерного объекта возможно, применив специальное оборудование и программное обеспечение, позволяющее поместить объект и исследователя в одну виртуальную среду с сохранением отношения размеров (масштабов).

Для создания виртуальной среды применяются шлем виртуальной реальности, контроллеры, камеры в совокупности со специализированным программным обеспечением – Unreal Engine, Unity и др. [15].

Для реализации трехмерных объектов понадобится следующее ПО: Unreal Engine 4 и Datasmith [16].

Datasmith – это плагин (инструмент), который позволяет конвертировать трехмерные объекты (сцену) с текстурами из 3D Max в сцену Unreal Engine 4 [16].

Для более достоверной оценки эргономических свойств трехмерная модель мягкой мебели экспортируется в заранее спроектированную и визуализированную сцену интерьера в 3D Max.

После применения инструмента Datasmith сцена вместе с материалами объектов конвертируется и сохраняется с расширением datasmith.

Запуск программного обеспечения Unreal позволяет создать пустой уровень, в который с помощью инструмента Datasmith импортируются все ранее сохраненные файлы.



Рис. 9. Скриншот интерфейса с отображением трехмерных моделей в виртуальном пространстве

Загрузив файлы в библиотеку моделей Unreal и перетягивая трехмерные модели во व्यूपорт (видимая на экране область документа), можно формировать сцену интерьера с внедрением в нее дивана и настроить свет в помещении. На рис. 9 представлен скриншот полученного виртуального пространства. Затем, применив специальное оборудование для VR (шлем, контроллеры), можно попасть в виртуальный интерьер с ранее спроектированным объектом (диваном), что позволяет оценить эргономические свойства: габариты, встраиваемость, художественный аспект.

Заключение. В результате выполнения поставленной цели установлено, что применение современных информационных технологий, таких как 3D-моделирование и визуальная реальность (VR), дает возможность создавать реалистичные трехмерные модели мягкой мебели для визуальных оценок, а также для принятия реше-

ний об их производстве. В полученной модели отображаются все конструктивные особенности и пропорции изделия: формы модулей, складки ткани, пикровка, фурнитура и отделка.

Использование виртуальной реальности позволяет рассматривать и оценивать изделия мягкой мебели в масштабе 1:1. Данная технология помогает оценить эргономические и функциональные решения при проектировании, что, в свою очередь, значительно экономит финансовые и временные ресурсы.

Таким образом, разрабатывать новые коллекции, дизайнерские линии и отдельно взятые предметы мягкой мебели намного легче с применением специально предназначенных для этого программ, которые позволяют изменить привычный подход к проектированию, отдавая предпочтение лучшим вариантам, идеально соответствующим комплексу предъявляемых к мебели требований.

Список литературы

1. Проектирование мягкой мебели // Proekt-sam. URL: <https://proekt-sam.ru/proektmebel/proektirovanie-i-konstruirovaniye-myagkoj-mebeli.html> (дата обращения: 24.09.2022).
2. 9 приложений для проектирования мебели // All in one person. URL: <https://blog.themarfa.name/9-prilozhenii-dlia-proektirovaniia-miebieli/> (дата обращения: 24.09.2022).
3. Эргономические требования к изделиям для сидения и лежания // Studwood. URL: https://studwood.net/2124268/tovarovedenie/ergonomicheskie_trebovaniya_izdeliyam_sideniya_lezhaniya (дата обращения: 24.09.2022).
4. Что такое эргономика мебели // ДомДворДороги. URL: <https://domdvordorogi.ru/chto-takoe-ergonomika-mebeli/> (дата обращения: 24.09.2022).
5. Барташевич А. А., Трофимов С. П. Конструирование мебели. Минск: Современная шк., 2006. 336 с.
6. Чижикова Л. А. Эргономические аспекты при проектировании графического пользовательского интерфейса программных приложений авиационной тематики // Международный журнал. 2016. № 3: Программные продукты и системы. С. 1–9. DOI: 10.15827/2311-6749.16.3.1.
7. Программа для создания эскизов мебели: 9 приложений для проектирования мебели // ДК кафе. URL: <https://dk-nn.ru/raznoe/programma-dlya-sozdaniya-eskizov-mebeli-9-prilozhenii-dlia-proektirovaniya-mebeli.html> (дата обращения: 24.09.2022).

8. Новые технологии стимулируют рынок предметов интерьера // ChinaВЭД. URL: <https://chinaved.com/new-technologies-boost-house-decoration-market> (дата обращения: 23.09.2022).
9. Программа для проектирования мягкой мебели – специализированный программный комплекс АССОЛЬ // Центр «АССОЛЬ – Прикладные Компьютерные Технологии». URL: <https://assol.org/tpost/6revs1hdh1-programma-dlya-proektirovaniya-myagkoi-m> (дата обращения: 24.09.2022).
10. Программа для конструирования чехлов для мебели. Лучшие программы для проектирования мебели // StrojDizain. URL: <https://strojdizain.ru/programma-dlya-konstruirovaniya-chehlov-dlya-mebeli-luchshie/> (дата обращения: 24.09.2022).
11. 3dsmax-book // Интерактивный самоучитель 3dsmax-book.ru. URL: <https://3dsmax-book.ru/index.php> (дата обращения: 24.09.2022).
12. Текстуры // Blend4web. URL: <https://www.blend4web.com/doc/ru/textures.html> (дата обращения: 24.09.2022).
13. 3D Studio MAX: первые шаги. Урок 14. Камеры в сцене // Компьютер пресс. URL: <http://surl.li/dalju> (дата обращения: 30.09.2022).
14. 3Ds max. Основы. Как и с чего начать? // Хабр. URL: <https://habr.com/ru/post/326532/> (дата обращения: 24.09.2022).
15. 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.
16. Unreal Engine 4 Documentation // Epic Games. New York, 2004. URL: <https://docs.unrealengine.com/4.27/en-US/> (дата обращения: 30.09.2022).

References

1. Upholstered furniture design. Available at: <https://proekt-sam.ru/proektmebel/proektirovanie-i-konstruirovaniya-myagkoj-mebeli.html> (accessed 24.09.2022) (In Russian).
2. 9 applications for furniture design. Available at: <https://blog.themarfa.name/9-prilozhenii-dlia-proektirovaniya-mebeli/> (accessed 24.09.2022) (In Russian).
3. Ergonomic requirements for products for sitting and lying down. Available at: https://studwood.net/2124268/tovarovedenie/ergonomicheskie_trebovaniya_izdeliyam_sideniya_lezhaniya (accessed 24.09.2022) (In Russian).
4. What is furniture ergonomics? Available at: <https://domdvordorogi.ru/chto-takoe-ergonomika-mebeli/> (accessed 24.09.2022) (In Russian).
5. Bartashevich A. A., Trofimov S. P. *Konstruirovaniye mebeli* [Furniture design]. Minsk, Sovremennaya shkola Publ., 2006. 336 p. (In Russian).
6. Chizhikova L. A. Ergonomic aspects in designing the graphical user interface of aviation-related software applications. *Mezhdunarodnyy zhurnal* [International Journal], 2016, no. 3: Software products and systems, pp. 1–9. DOI: 10.15827/2311-6749.16.3.1 (In Russian).
7. A program for creating furniture sketches: 9 applications for furniture design. Available at: <https://dk-nn.ru/raznoe/programma-dlya-sozdaniya-eskizov-mebeli-9-prilozhenij-dlya-proektirovaniya-mebeli.html> (accessed 24.09.2022) (In Russian).
8. New technologies stimulate the market of interior items. Available at: <https://chinaved.com/new-technologies-boost-house-decoration-market> (accessed 23.09.2022) (In Russian).
9. The program for the design of upholstered furniture is a specialized software package ASSOL. Available at: <https://assol.org/tpost/6revs1hdh1-programma-dlya-proektirovaniya-myagkoi-m> (accessed 24.09.2022) (In Russian).
10. A program for designing covers for furniture. The best programs for furniture design. Available at: <https://strojdizain.ru/programma-dlya-konstruirovaniya-chehlov-dlya-mebeli-luchshie/> (accessed 24.09.2022) (In Russian).
11. 3dsmax-book. Available at: <https://3dsmax-book.ru/index.php> (accessed 24.09.2022) (In Russian).
12. Textures. Available at: <https://www.blend4web.com/doc/ru/textures.html> (accessed 24.09.2022) (In Russian).
13. 3D Studio MAX: the first steps. Lesson 14. Cameras in the scene. Available at: <http://surl.li/dalju> (accessed 30.09.2022) (In Russian).
14. 3Ds max. Basics. How and where to start? Available at: <https://habr.com/ru/post/326532/> (accessed 24.09.2022) (In Russian).

15. 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).

16. Unreal Engine 4 Documentation. Available at: <https://docs.unrealengine.com/4.27/en-US/> (accessed 30.09.2022).

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

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

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

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

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

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

Поступила 15.10.2022

УДК 685.635.54

Н. Ю. Шелемет, А. С. Чуйков

Белорусский государственный технологический университет

**ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КЛЮШКАМ
ДЛЯ ХОККЕЯ НА ТРАВЕ (ОБЗОР)**

Статья включает обзор требований, предъявляемых Международной федерацией хоккея на траве, к длине клюшки, ее массе, форме крюка и лезвия, его размерам, высоте стрелы прогиба, удалению ее высоты от основания, толщине клюшки и другим параметрам, отклонение от которых в спортивном изделии не допускается. Также в ней описаны методы и инструменты, используемые для контроля допустимых отклонений в конструктивных элементах изделия, и некоторые эксплуатационные особенности данного спортивного инвентаря. Изделие должно обладать высокой прочностью и долговечностью, поскольку хоккей на траве является контактным видом спорта. Рассмотрены конструктивные элементы клюшек для хоккея на траве, особенности их форм, которые могут меняться в зависимости от параметров, характерных конечному продукту. Данные конструктивные особенности зависят от уровня игры спортсмена, его силы, позиции которую он занимает на поле, стиля игры и других факторов. Отражены преимущества, получаемые игроком в хоккей на траве, в зависимости от характеристик, которыми обладает выбранный спортивный инвентарь. В частности, клюшки с меньшей массой чаще предпочитают игроки нападения, так как такой спортивный инвентарь обеспечивает более высокое динамическое управление мячом.

Ключевые слова: клюшка, хоккей на траве, особенность, требования, характеристики, масса, жесткость, длина, элемент, крюк.

Для цитирования: Шелемет Н. Ю., Чуйков А. С. Геометрические особенности конструктивных элементов и требования, предъявляемые к клюшкам для хоккея на траве (обзор) // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 165–176. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-18.

N. Yu. Shelemet, A. S. Chuikov

Belarusian State Technological University

**GEOMETRIC FEATURES OF STRUCTURAL ELEMENTS AND REQUIREMENTS
FOR FIELD HOCKEY STICKS (REVIEW)**

The article includes an overview of the requirements imposed by the International Field Hockey Federation on the length of the stick, its mass, the shape of the hook and blade, its dimensions, the height of the deflection boom, the distance of its height from the base, the thickness of the stick and other parameters, the deviation from which in a sports product is not allowed. The methods and tools used to control the tolerances in the structural elements of the product are also described. Some operational features of this sports equipment are described. The product must have high strength and durability, since field hockey is a contact sport. The structural elements of a stick for field hockey, the features of their forms, which can vary depending on the parameters that the final product should have, are considered. These design features depend on the level of the athlete's game, his strength, the position he occupies on the field, the style of play and other factors. The advantages that a field hockey player receives, depending on the characteristics that the selected sports equipment has, are described. In particular, clubs with less mass are more often preferred by attacking players, as such sports equipment provides higher dynamic ball control.

Keywords: stick, field hockey, feature, requirements, characteristics, mass, stiffness, length, element, hook.

For citation: Shelemet N. Yu., Chuikov A. S. Geometric features of structural elements and requirements for field hockey sticks (review). *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 165–176. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-18 (In Russian).

Введение. История появления хоккея на траве до конца не известна. По некоторым данным, он появился еще около 2000 года до нашей эры. Об этом свидетельствует находка изображения

двух игроков с клюшками, борющимися за мяч, на пирамиде рядом с населенным пунктом Бени Хасан (долина Нила). Подобные игры были и у японцев с индейцами-ацтеками. На стекле

вitraжа в северном хорале Кентерберийского кафедрального собора в Англии нарисован ребенок, который держит клюшку и мяч, данное изображение относят к XII веку [1].

Более широкое распространение хоккей на траве получил в XIX веке в Англии. В него играли ученики школ, студенты высших учебных заведений. Это способствовало развитию игры. И уже в 1861 году в Англии был образован первый хоккейный клуб, который носил название «Блэкхит». К концу 1970-х годов хоккей на траве стал самым популярным видом спорта среди студентов Оксфордского и Кембриджского университетов. Первый официальный матч по хоккею на траве прошел между студентами именно этих учебных заведений [2]. Согласно правилам, в хоккей на траве играют 2 команды, в каждую из которых входит 11 человек. Основной инвентарь – клюшки и мяч. В состав команды входят 1 вратарь, игроки защитной линии, полузащитники и нападающие. Победу одерживает команда, которая забила сопернику большее количество мячей. Для достижения этой задачи разрешено пользоваться только клюшкой. Мячи, забитые с помощью ног или рук, не засчитываются. Однако вратарь имеет право играть и ногами, и руками. Игра длится 2 тайма по 35 мин, если за это время победитель не определился, то фиксируется ничья или назначается дополнительное время, по истечению которого будет выявлен победитель [3].

Хоккей на траве является олимпийским видом спорта и одной из самых распространенных в мире спортивных игр. Наибольшей популярностью хоккей на траве пользуется в Индии, Пакистане, Австралии, а также Испании, Нидерландах, Великобритании, США и Канаде. На сегодняшний день число людей, увлекающихся хоккеем на траве или его разновидностью в крытых помещениях – индорхоккеем, превышает 70 млн человек [4].

В Республике Беларусь в настоящее время хоккей на траве набирает популярность. Женская национальная команда Республики Беларусь является постоянным участником чемпионатов Европы высшего дивизиона. Дважды становилась серебряным, 4 раза бронзовым призером, а в январе 2020 года стала чемпионом Европы [5]. В связи с ростом популярности данного вида спорта возрастает и спрос на спортивный инвентарь.

Конструкция клюшки для хоккея на траве на протяжении последних десятилетий подвергалась значительным изменениям, как с целью ее более эффективного использования и достижения высоких спортивных результатов, так и для того, чтобы игроки находились в равных

условиях. В связи с тем что хоккей на траве является контактным видом спорта, где нередко случаются травмы спортсменов, Международная федерация хоккея на траве (FIH) предъявляет особые требования, которым должна соответствовать хоккейная клюшка. Из-за постоянного контакта клюшек игроков друг о друга и для поддержания определенного темпа игры спортивный инвентарь должен обладать определенными эксплуатационными свойствами. При подборе клюшки нужно учитывать возраст, уровень игры, рост, силу игрока, а также позицию, которую он занимает на поле. Все это необходимо принимать во внимание при дальнейшем производстве клюшек.

В связи с этим анализ конструктивных элементов и требований, предъявляемых к ним, позволит в дальнейшем создать отечественный продукт, способный конкурировать с зарубежными аналогами.

Основная часть. Современные клюшки для хоккея на траве имеют традиционную форму, состоящую из рукояти (a) и крюка (b) (рис. 1) [6].



Рис. 1. Клюшка для хоккея на траве

В хоккее на траве играют только правой рукой, поэтому все клюшки изготавливают под правую руку. Игровой стороной клюшки является левая часть спортивного инвентаря. Спортсменам запрещается играть обратной стороной клюшки (рис. 2) [7].



Рис. 2. Игровая (a) и обратная (b) сторона клюшки

Рукоятка имеет форму цилиндра, чаще всего диаметром 25 или 30 мм [8]. Она предназначена для удерживания клюшки, а ее цилиндрическая форма способствует равномерному распределению нагрузки на кисти и пальцы спортсмена при ударах и обработке мяча [9].

Рукоять разделяют на 3 участка (рис. 3). Участок (b) представляет собой переходную

область между рукояткой (*a*) и лезвием (*б*). На этом сегменте происходит изменение формы сечения клюшки от окружности (сечение *A-A*) к более вытянутой форме, напоминающей усеченный полукруг (сечение *B-B*) с закругленными краями [10].

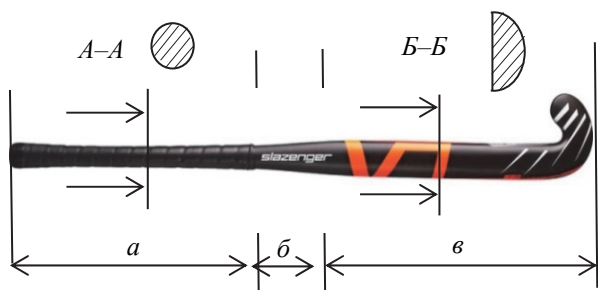


Рис. 3. Элементы рукояти клюшки для хоккея на траве

Далее описаны требования, которые предъявляют к клюшкам для хоккея на траве. Отклонения от данных характеристик не допускаются.

Форму и размеры проверяют путем размещения клюшки игровой стороной вниз на ровной поверхности, на которую нанесены линии, показанные на рис. 4. Линии *A-A*, *AI-AI*, *B-B*, *BI-BI* и *(Y+)-(Y-)* параллельны и перпендикулярны линиям *C-C* и *(X-)-(X+)*. В табл. 1 указаны размеры, отраженные на рис. 4.

Линия *(Y+)-(Y-)* проходит через центр в верхней части рукояти. Рукоять клюшки начинается от линии *C-C* и продолжается в направлении *Y+*.

Основание крюка клюшки располагается на стыке с линией *(X-)-(X+)*; крюк клюшки начинается от линии *(X-)-(X+)* и заканчивается на линии *C-C* [10].

Линейные размеры клюшки оцениваются вместе с любыми покрытиями, обмотками или отделкой, которые являются частью спортивного инвентаря.

Таблица 1

Размеры клюшки для хоккея на траве

Расстояние между линиями	Значение, мм
<i>A-A</i> и <i>AI-AI</i>	51
<i>A-A</i> и <i>B-B</i>	20
<i>AI-AI</i> и <i>BI-BI</i>	20
<i>A-A</i> и <i>(Y+)-(Y-)</i>	25,5
<i>C-C</i> и <i>(X-)-(X+)</i>	100

Форму и характер поверхности клюшки, как правило, описывают следующим образом:

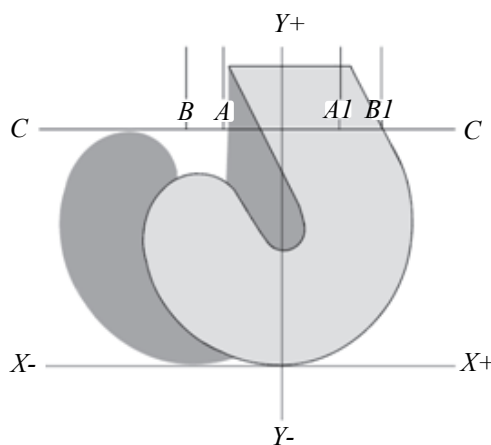
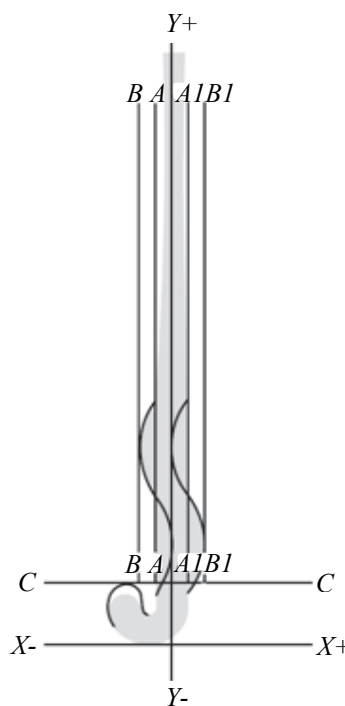


Рис. 4. Допустимые форма и размеры клюшки для хоккея на траве

1) гладкая – поверхность без шероховатых и острых частей, ровная и равномерная, без заметных выступов, углублений, морщин, канавок и надразов. Края должны иметь закругление с радиусом не менее 3 мм;

2) плоская – поверхность без искривлений выпуклых и вогнутых частей, имеющих радиус менее 2 мм, гладко сопрягающаяся на краях с радиусом не менее 3 мм;

3) непрерывная – равномерная поверхность вдоль всего предмета.

Переход от рукояти к крюку должен быть гладким и непрерывным.

Крюк должен быть выполнен в форме буквы «J» или «U», иметь загиб вверх, открытый конец

которого ограничен линией $C-C$ (см. рис. 4), но он не ограничивается по ширине в пределах линий $C-C$ и $(X-)-(X+)$ в направлении $(X-)$ или $(X+)$.

Крюк должен иметь плоскую поверхность только с левой стороны (сторона, которая находится слева от игрока, когда он держит клюшку перед собой, направленную вперед открытым концом крюка) [11].

Игровая сторона крюка может иметь выпуклость или вогнутость с гладким и непрерывным профилем [10]. Данный параметр проверяют путем размещения поверенной линейки длиной 53 мм поперек клюшки в любой точке игровой стороны. После чего измеряют значение параметра с использованием стандартного глубиномера. Для этой цели также можно использовать инструмент для измерения загиба, показанный на рис. 5. Глубина кривизны игровой стороны клюшки под линейкой не должна превышать 4 мм [10].

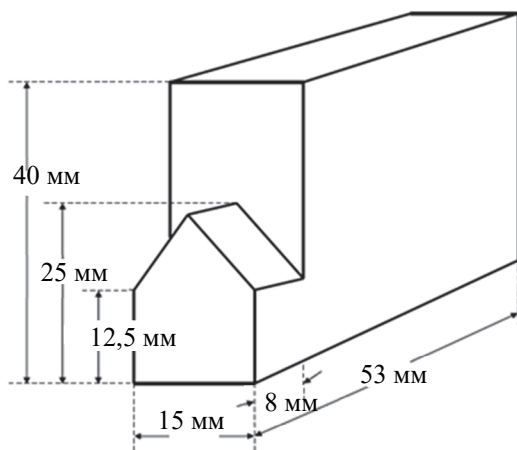


Рис. 5. Инструмент для измерения загиба клюшки

Другие углубления на игровой стороне клюшки не допускаются. Игровая сторона крюка клюшки и любое ее продолжение по рукоятки должны быть гладкими.

Скручивание лезвия, а также скручивание вдоль плоской игровой стороны клюшки от крюка и вдоль любого продолжения ее по рукоятки не допускаются. Пересечение плоскости, образуемой плоской игровой стороной крюка клюшки с любой плоскостью, образуемой всей или частью плоской стороны рукоятки, должно оставаться параллельным линии $C-C$ [12].

Допускается, чтобы рукоять имела такие изгиб или искривление, чтобы отклоняться за линию $A-A$ в пределах линии $B-B$ или (но не одновременно) за линию $AI-AI$ в пределах линии $BI-BI$ (см. рис. 4) [10].

Любой изгиб по длине клюшки должен иметь плавный профиль по всей длине с игро-

вой или с обратной стороны клюшки, но не с обеих сторон, и не должен превышать по глубине 25 мм (рис. 6). Точка максимального загиба должна быть не ближе 200 мм к основанию крюка (линия $(X-)-(X+)$ на рис. 4). Не допускается более одного изгиба [12].

Клюшку опускают игровой стороной вниз на ровную поверхность в естественном состоянии покоя, как показано на рис. 6. Для измерения высоты стрелы прогиба используют инструмент, показанный на рис. 5, который кладут своим основанием на испытательную поверхность. Конеч инструмент, имеющий высоту 25 мм, не должен проходить свободно на глубину более 8 мм под клюшку в любой точке; т. е. инструмент не должен проходить под спортивным инвентарем беспрепятственно до момента, когда край клюшки коснется оставшейся части инструмента [10].

Края и неигровая (обратная) сторона спортивного инвентаря должны быть закругленными и иметь непрерывный гладкий профиль. Плоские части на краях или обратной стороне клюшки не допускаются [10].

Разрешается наличие гладких и мелких неровностей и углублений с максимальной глубиной 4 мм на обратной стороне лезвия. Не допускаются неровности и углубления на обратной стороне крюка спортивного инвентаря [10].

Со всеми дополнительными покрытиями клюшка должна проходить через кольцо с внутренним диаметром 51 мм.

Общий вес спортивного инвентаря не должен превышать 737 г.

Длина клюшки при измерении от конца ручки до основания крюка (линия $(X-)-(X+)$ на рис. 4) не должна превышать 105 см [11].

Скорость мяча должна быть не выше, чем 98% скорости крюка клюшки в тестовых условиях [12].

Скорость мяча определяется по серии из 5 тестов при скорости клюшки 80 км/ч на симуляторе лаборатории, одобренной ФИН. Скорость мяча рассчитывается по времени прохождения им двух измерительных точек и выражается как отношение к указанной скорости клюшки. Используются одобренные ФИН мячи. Тест проводится в лабораторных условиях при температуре около 20°C и относительной влажности около 50% [10].

Клюшка не должна иметь острых углов и граней. Клюшки, представляющие потенциальную опасность для игры, запрещены.

Клюшка и возможные дополнения могут быть изготовлены или содержать любой материал, кроме металла или металлических компонентов, при условии, что они подходят для игры в хоккей и не являются опасными.

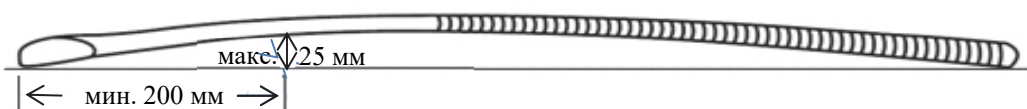


Рис. 6. Стрела прогиба клюшки

Применение антискользящих лент и смол допускается при условии, что они не являются опасными и что клюшка соответствует спецификациям [12].

Не смотря на то, что все клюшки для хоккея на траве состоят из одних и тех же конструктивных элементов, описанных выше, в хоккее на траве играют люди разного роста, силы, различной возрастной категории, имеющие разный уровень мастерства и разнообразный стиль игры. Поэтому для разных типов игроков изготавливают спортивный инвентарь с определенными характеристиками, которые больше всего для них подходят. Таким образом, в зависимости от условий эксплуатации клюшки будут меняться ее параметры, такие как длина, конструкция крюка, стрела прогиба, смещение крюка, масса клюшки, центр тяжести, жесткость, прочность и другие, в результате чего образуется множество конструктивных особенностей клюшек для хоккея на траве, которые необходимо учитывать при их дальнейшем производстве [13].

Как правило, длина клюшки для хоккея на траве зависит от роста игрока. Длина изделия может варьироваться от 60 до 105 см с градацией приблизительно в 2 см. Основная рекомендация заключается в том, чтобы верхняя часть хоккейной клюшки доходила до верхней части бедренной кости (рис. 7) [14].

При этом каждый размер спортивного инвентаря обладает своими достоинствами и недостатками. Длинная клюшка чаще используется защитниками или игроками полузащиты, для того чтобы увеличить расстояние на которое они могут дотянуться для удара по мячу, в то время как более короткие клюшки предпочтительнее для нападающих, так как обеспечивают лучший контроль, маневрируемость и управление мячом. Несмотря на это, игрок всегда должен чувствовать себя комфортно с хоккейной клюшкой, которой он играет [15].

Есть два стандартных метода определения длины клюшки в зависимости от роста: американский и голландский (рис. 7) [16].

Суть американского метода заключается в том, что если клюшку держать сбоку перпендикулярно земле, то длина наиболее подходящей клюшки будет на 3–6 см выше талии.

Голландский метод подразумевает, что лучшая длина клюшки равняется расстоянию между подмышечной областью и коленной чашечкой.

Как правило, производители клюшек для игры в хоккей на траве занимаются изготовлением клюшек трех видов (легких, средних и тяжелых), которые отличаются по весу одна от другой на 30–40 г.

Длина клюшки для хоккея на траве			
Американский метод		Голландский метод	
Рост, см	Длина клюшки, см	Рост, см	Длина клюшки, см
<122	<70	<122	<70
122–134	70–76	122–134	70–76
137–143	76–80	137–143	76–80
144–152	80–84	144–152	80–84
153–165	84–88	153–165	84–88
167–171	88–92	167–171	88–92
173–177	92–96	173–177	92–96
>180	>96	>180	>96

Рис. 7. Определение длины клюшки в зависимости от роста американским и голландским методом

Непрекращающийся процесс совершенствования клюшек для игры в хоккей на траве, изготовленных из более легких композиционных материалов, благодаря которым инвентарь обретает большую жесткость, одновременно имея небольшую массу, привел к тому, что производители стали выпускать так называемые суперлегкие клюшки [17]. Клюшки распределяют по типам в зависимости от их массы следующим образом (табл. 2).

Таблица 2

**Распределение клюшек на типы
в зависимости от массы**

Масса, г	Тип клюшки
510–550	Суперлегкая
540–600	Легкая
590–630	Средняя
620–737	Тяжелая

Чем сильнее игрок, тем проще ему будет контролировать более тяжелую клюшку. Если клюшка будет весить слишком много для игрока, это негативно отразится на его игре. Поэтому игроки все чаще выбирают легкие и суперлегкие хоккейные клюшки [18].

Игроки защиты часто делают более сильные передачи на дальние расстояния или же отборы мяча наряду с блокировками. Именно поэтому им нужна более тяжелая клюшка, с помощью которой можно увеличить силу удара и не дать ей уйти в сторону в случае блокировки. Тяжелые клюшки более долговечны, так как при их производстве используется большее количество материала. Нападающие чаще предпочитают легкие клюшки, так как при их использовании можно быстрее совершать замах назад. Также они дают возможность лучше контролировать мяч и управлять им по собственному усмотрению [19].

Стоит отметить, что положение центра тяжести и масса клюшки влияет на такие параметры, как скорость игры и сила удара. Таким образом, при смещении центра тяжести ближе к рукоятке и уменьшении массы клюшки повышается маневренность игрока и контроль мяча. При смещении центра тяжести ближе к крюку и увеличении массы клюшки – увеличивается сила удара [20].

Прочность клюшки для хоккея на траве в большей степени зависит от материалов, из которых она изготовлена. Международная федерация хоккея на траве не допускает металлических элементов конструкции в связи с опасностью травмирования игроков [21]. Двумя основными материалами, из которых изготавливают клюшки, являются древесина и композиционный ма-

териал [22]. Древесина – это природный материал, она не имеет высокой прочности и долговечности, поэтому для таких клюшек требуется дополнительное армирование [23]. Композиционный материал изготавливают из графитового волокна, кевлара и стекловолокна, объединенных при помощи полимерного связующего. Такой материал обладает высокой прочностью и долговечностью [24].

Жесткость оказывает влияние на несколько важных эксплуатационных характеристик. При увеличении жесткости уменьшается чувствительность клюшки [25]. Также жесткость является важнейшим параметром при броске мяча, поскольку любое малейшее искривление клюшки во время удара влияет на траекторию полета спортивного снаряда [26]. Когда игрок совершает бросок, он вначале заводит клюшку за спину, а затем опускает ее к мячу, таким образом он пользуется физическим свойством, известным как инерция вращения или момент инерции [27].

Инерция подразумевает, что объект, находящийся в движении, будет стремиться оставаться в движении до тех пор, пока не встретит противодействующую силу, а объект, находящийся в состоянии покоя, будет стремиться оставаться в покое, пока на него не подействует противодействующая сила.

Инерция вращения зависит от массы в конце диаметра дуги или поворота объекта. Чем больше сила, приложенная к мячу, и чем дальше она находится от центра вращения, тем больше момент инерции [28].

Не смотря на то, что клюшка для хоккея на траве является довольно жесткой, имеется второй способ увеличить силу удара хоккейной клюшкой за счет так называемого «эффекта рогатки». Первое, с чем соприкасается клюшка при броске, – не мяч, а покрытие. Таким образом, она сгибается и накапливает упругую энергию, которая высвобождается при соприкосновении с мячом [29].

В результате, если согнуть клюшку, не ускоряя ее, подобно тому, как лучник выпускает стрелу из лука, то при ударе на мяч будет действовать не только кинетическая энергия, полученная в результате соприкосновения клюшки с мячом, но и упругая энергия клюшки, высвобождаемая при ее разгибании [30]. Чем выше жесткость клюшки, тем большую силу необходимо приложить для того, что бы ее согнуть, а следовательно, тем сильнее должен быть игрок [31]. Стоит также отметить, что чем короче клюшка, тем будет выше ее жесткость [32].

Выделяют четыре основные формы крюка клюшки для хоккея на траве: укороченный, средний, удлиненный U-образный. Они скон-

струированы в зависимости от позиции игрока (рис. 8) [33].

Короткий крюк обеспечивает максимальную маневренность и ловкость, но при этом уменьшается поверхность для приема мяча и удара, что сказывается на качестве контроля мяча и также на силе удара. Более длинный крюк имеет большую площадь, что увеличивает возможности контроля, но снижает общую маневренность клюшки [34].

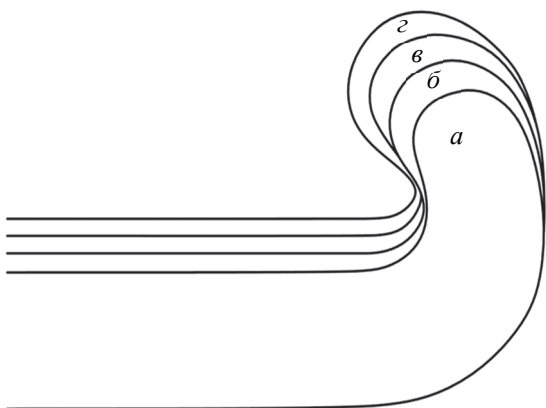


Рис. 8. Формы крюка клюшки для хоккея на траве:
а – укороченный; б – средний;
в – удлиненный; з – U-образный

Укороченный крюк отлично подходит для быстрого поворота клюшки над мячом. Обычно используется нападающими из-за его баланса, маневренности и контроля [35].

Средний крюк, безусловно, наиболее широко используемая форма для начинающих и ползащитников. Чуть длиннее, чем укороченный, он обеспечивает большую площадь ударной поверхности без значительного снижения маневренности, делая рывки, приемы и обработку мяча проще и удобнее, что особенно важно для новых игроков [36].

Удлиненный – самый большой из стандартных крюков, который сочетает в себе дополнительную принимающую поверхность J-образного крюка и ударную силу среднего крюка. Такой вид крюка чаще всего предпочитают защитники из-за широкой ударной и принимающей поверхности крюка, а также большой силы удара [37].

U-образный крюк имеет дополнительную площадь поверхности, которая предназначена для улучшения контроля и эффективности ведения мяча, а также для игры клюшкой в обратном направлении. Лучше всего подходит для игроков с прямым стилем игры [38–39].

Почти каждая современная клюшка имеет изгиб по длине от рукоятки до крюка, который

необходим для того, чтобы проще поднимать мяч в воздух и увеличить силу удара. Большинство клюшек имеет высоту прогиба от 17 до 25 мм. Положение точки максимального прогиба может изменяться от основания рукоятки ближе или дальше к крюку, но должно находиться на расстоянии не менее 200 мм от основания крюка. Таким образом, изменяя положение центра тяжести клюшки, можно корректировать стиль игры [40–41].

Например, стандартный изгиб в равной степени полезен для всех областей игры, в то время как более высокий изгиб создает сильный угол наклона крюка. Такая конструкция позволяет повысить динамическое управление и упростить возможность подъема мяча. Выбор высоты прогиба зависит от предпочтений, возраста и уровня мастерства игрока [42].

Хотя параметры высоты прогиба и точки его удаления относительно основания крюка имеют огромное количество вариаций, все же выделяют 4 основных типа стрелы прогиба клюшки для хоккея на траве, которые обозначены на рис. 9 [43].

1. Сверхнизкий прогиб наиболее популярен среди профессиональных игроков. Он значительно облегчает подъем мяча. Экстремальный изгиб также обеспечивает идеальные условия для ведения мяча по полю. Обычно его высота составляет 24–25 мм, а положение точки наибольшей высоты находится на расстоянии 200 мм от основания крюка. Недостатком данного прогиба является низкий уровень контроля мяча [44].

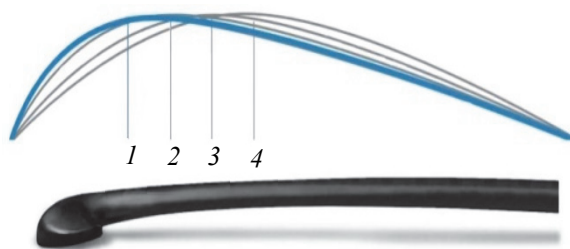


Рис. 9. Основные типы стрелы прогиба клюшки для хоккея на траве:

- 1 – сверхнизкий прогиб;
- 2 – низкий прогиб; 3 – средний прогиб;
- 4 – стандартный прогиб

2. Низкий прогиб разработан для универсальных игроков. Он объединяет в себе достоинства обеих форм. С одной стороны, он также облегчает подъем мяча и игру в воздухе, а с другой – не слишком экстремальная высота изгиба позволяет сохранять контроль над мячом на должном уровне. Высота прогиба для такого типа клюшек составляет 24 мм, а положение

точки его наибольшей высоты находится на расстоянии 220–250 мм от основания крюка [45].

3. Средний прогиб предназначен для улучшения возможности приема и контроля мяча. Клюшки с таким типом изгиба обеспечивают хорошее динамическое управление и возможность высокого маневрирования. Как правило, высота прогиба составляет 20–22 мм, а положение точки с его наибольшей высотой находится на расстоянии 250–300 мм от основания крюка [46].

4. Стандартный прогиб имеет классическую форму. Самая высокая его точка приходится на среднюю часть клюшки, что помогает максимизировать контроль над мячом, и в то же время позволяет выполнять сложные маневры. Клюшки с данным типом стрелы прогиба больше всего подходят для начинающих игроков. Высота изгиба составляет 17–20 мм, а ее положение находится на расстоянии 300–350 мм от основания крюка [47].

Клюшки могут быть изготовлены с изгибом рукояти (рис. 10) [48]. Такая конструкция увеличивает площадь поверхности при остановке и обработке мяча. Поэтому клюшки с данной особенностью конструкции получили наибольшую популярность у вратарей [49].

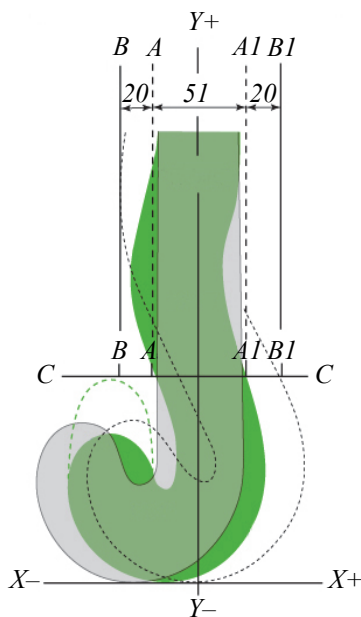


Рис. 10. Образец вратарской клюшки с изгибом рукояти в сторону крюка

Клюшки для хоккея на траве также изготавливают со смещением крюка назад (рис. 11). Из рис. 11, а видно, что (независимо от того имеет лезвие изгиб или нет) при совпадении центральной оси клюшки и мяча площадь контакта неполная из-за того, что часть шара находится в стороне от крюка. Для того чтобы исправить данную ситуацию и увеличить пятно

контакта, можно отклонить от вертикали ось рукояти путем смещения крюка назад, как показано на рис. 11, б. Такая клюшка закрывает большую часть мяча и уменьшает вероятность отклонения его траектории движения при остановке. Таким образом, данная конструкция клюшки предназначена для увеличения контроля над мячом, и поэтому также чаще используется вратарями [50].

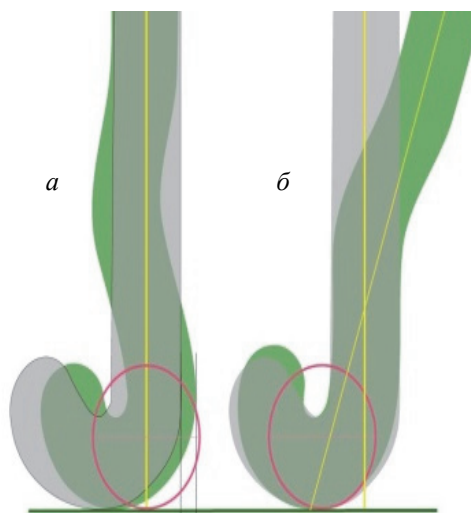


Рис. 11. Иллюстрация остановки мяча и удара по нему клюшкой с крюком со смещением и без

Заключение. Международная федерация хоккея на траве предъявляет к спортивному инвентарю ряд требований, от которых следует отталкиваться при разработке конструкции клюшки. Хоккей на траве является контактным видом спорта, где клюшка может испытывать серьезные нагрузки, поэтому она должна быть достаточно прочной и соответствовать определенным эксплуатационным параметрам. В настоящее время в Республике Беларусь производство клюшек для хоккея на траве не налажено ни на одном предприятии. Анализ зарубежного рынка спортивного инвентаря для хоккея на траве показал, что наибольшее распространение получили клюшки, выполненные из древесины и композиционных материалов. Ввиду высокой стоимости клюшек, а также сложившейся политической ситуации в мире закупка спортивного инвентаря за рубежом не представляется возможной. В связи с этим изучение геометрических особенностей конструктивных элементов и требований, предъявляемых к клюшкам для хоккея на траве, является первым шагом, необходимым для разработки отечественной технологии изготовления спортивного инвентаря и налаживания дальнейшего промышленного производства в Республике Беларусь.

Список литературы

1. Горбунова О. А., Прыткова Е. С. Развитие хоккея на траве в России // Игровые виды спорта: актуальные вопросы теории и практики: сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 23–24 окт. 2020 г. Воронеж, 2020. С. 292–295.
2. Физкультура и спорт. Малая энциклопедия / под ред. А. Н. Кудина. М.: Радуга, 1982. 376 с.
3. Федотова Е. В. Хоккей на траве. М.: Физическая культура и спорт, 2005. 279 с.
4. Ключка для хоккея на траве или индорхоккея: пат. RU 94868U1 / Г. В. Галашев. Оpubл. 10.06.2010.
5. Хоккей на траве // Sportwiki. URL: <http://ru.sport-wiki.org/vidy-sporta/hockey-na-trave/> (дата обращения: 03.10.2022).
6. Hockey Stick Buying Guide // AllRounder. URL: <https://www.allrounderhockey.com/hockey-stick-guide/> (дата обращения: 13.10.2022).
7. Guillem Ribó Torres. Design of the supply chain for a new field hockey company in south america – Rio de Janeiro. Brasil, 2019. 82 p.
8. Все для хоккея на траве: технические характеристики // Fihockey.ru. URL: <https://www.fihockey.ru/tekhnicheskie-kharakteristiki-klyushek-dlya-khokkeya-na-trave> (дата обращения: 13.10.2022).
9. Гуревич А. Г. Физика твердого тела. СПб.: Невский диалект, 2004. 320 с.
10. Правила вида спорта «Хоккей на траве» (ред. от 19.02.2018) // Кодификация.рф. URL: <https://rulaws.ru/acts/Pravila-vida-sporta-hockey-na-trave> (дата обращения: 13.10.2022).
11. Королёв В. А. Хоккей на траве: технические требования к спортивному оборудованию, инвентарю и другим спортивно-технологическим средствам. М.: Сов. спорт, 2012. 16 с.
12. FIH. Rules of Hockey including explanations. Switzerland: The International Hockey Federation, 2018. 67 p.
13. Овчинников Ю. Д. Теоретические основы биомеханики движений. Краснодар: КГУФКСТ, 2014. 35 с.
14. How to pick the perfect field hockey stick // Harrodsport. URL: <https://www.harrodsport.com/advice-and-guides/hockey-stick-comparison> (дата обращения: 03.10.2022).
15. Хоккейные клюшки по росту игрока // Хоккейные архивы. URL: <https://hockeyarchives.ru/articles/kak-podobrat-klyushku-po-rostu.html> (дата обращения: 03.10.2022).
16. Field Hockey Stick Buyers Guide // SportsUnlimited. URL: <https://www.sportsunlimitedinc.com/how-to-buy-a-field-hockey-stick.html> (дата обращения: 04.10.2022).
17. Вес // FloorDesign. URL: https://www.sportsystems.ru/equip_hockey_manual_weight.html (дата обращения: 03.10.2022).
18. How to choose the right field hockey stick // AnthemSports. URL: <https://www.anthem-sports.com/how-to-choose-the-right-field-hockey-stick> (дата обращения: 03.10.2022).
19. Выбор клюшки // Хоккей без границ. URL: <https://hockeybezgranic.ru/khochu-igrat/vybor-klyushki> (дата обращения: 03.10.2022).
20. Hockey stick buying guide // Grays. URL: <https://www.grays-hockey.com/pages/hockey-stick-buying-guide> (дата обращения: 03.10.2022).
21. Кузьмин М. А., Лебедев Д. Л., Попов Б. Г. Расчеты на прочность элементов многослойных композитных конструкций. М.: МГТУ, 2016. 344 с.
22. Материалы // Fihockey.ru. URL: <https://www.fihockey.ru/materialy-klyushek-dlya-khokkeya-na-trave> (дата обращения: 19.10.2022).
23. Уголев Б. Н. Древесиноведение и лесное товароведение. М.: МГУЛ, 2007. 351 с.
24. Препрег, армированный волокнами композитный материал и способ производства препрега: пат. RU 2509651C1 / Ф. Такаюки (JP), М. Дзун (JP), М. Аюми (JP), Й. Кенити (JP). Оpubл. 26.01.2012.
25. Кашина С. Г. Защита от вибрации. Казань: Казан. гос. архитект.-строит. ун-т, 2012. 133 с.
26. Hockey stick // Encyclopedia. URL: <https://www.encyclopedia.com/manufacturing/news-wires-white-papers-and-books/hockey-stick> (дата обращения: 03.10.2022).
27. Момент инерции // Wikipedia. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Момент_инерции (дата обращения: 03.10.2022).
28. Hockey Stick History // HowProductsareMade. URL: <http://www.madehow.com/Volume-4/Hockey-Stick.html> (дата обращения: 03.10.2022).
29. Rod Cross. Introduction to the Physics of Hockey Sticks // Tennis Warehouse University. URL: https://twu.tennis-warehouse.com/learning_center/index.php (дата обращения: 03.10.2022).

30. Как выбрать клюшку // Снаряд. URL: <https://snaryad.su/instrukcija-po-viboru-hokkejnoj-jekipirovki/kak-vibrat-klushku> (дата обращения: 03.10.2022).
31. Жесткость клюшки // СПОРТДЕПО. URL: <https://www.sportdepo.ru/how-to-choose-a-product/choosing-the-stiffness-of-the-stick/> (дата обращения: 19.10.2022).
32. Кузьмин М. А., Лебедев Д. Л., Попов Б. Г. Прочность, жесткость, устойчивость элементов конструкций. Теория и практикум. Расчеты на прочность элементов многослойных композитных конструкций. М.: МГТУ, 2012. 341 с.
33. Field Hockey Stick // Dimensoins. URL: <https://www.dimensions.com/element/field-hockey-stick> (дата обращения: 19.10.2022).
34. Клачков В. Э., Зиневич А. А., Матусевич О. С. Теория и методика спортивной подготовки в избранном виде спорта. Минск: Белорус. гос. ун-т физ. культуры, 2014. 597 с.
35. Форма ударной части клюшки (крюка) // Fihockey.ru. URL: <https://www.fihockey.ru/forma-udarnoi-chasti-klushki-dlya-khokkeya-na-trave> (дата обращения: 19.10.2022).
36. Field Hockey Stick // Sportsmatik. URL: <https://sportsmatik.com/sports-corner/sports-equipage-detail/field-hockey-stick> (дата обращения: 19.10.2022).
37. Пушкина Е. А. Тактика в спортивных играх // Электронный научный журнал. 2016. № 5. С. 566–571.
38. How to choose a field hockey stick // Hockey Performance Academy. URL: <https://hockeyperformanceacademy.com/how-to-choose-a-field-hockey-stick/> (дата обращения: 19.10.2022).
39. STICK INNOVATION // MAZON. URL: <https://www.mazonhockey.com/pages/stick-technology> (дата обращения: 19.10.2022).
40. Загиб // FLOORDESIGN. URL: https://www.sportsystems.ru/equip_hockey_manual_bow.html (дата обращения: 19.10.2022).
41. Hockey stick buyers guide // NET WORLDS SPORTS. URL: <https://www.networldsports.co.uk/buyers-guides/hockey-stick-guide> (дата обращения: 19.10.2022).
42. Info & Size Guide – Hockey Sticks // FlickHockey. URL: <https://www.flickhockey.com/hockeyinfo/en/info-size-guide-hockey-sticks/> (дата обращения: 19.10.2022).
43. Low bow or mid bow Hockey Stick // Hockeyhooked. URL: <https://hockeyhooked.com/low-bow-or-mid-bow-hockey-stick/> (дата обращения: 19.10.2022).
44. Stick Guide // Planethockey. URL: <https://planethockey.co.za/pages/stick-guide> (дата обращения: 19.10.2022).
45. Atlas Stick Curves // Atlashockey. URL: <https://atlashockey.com.au/pages/atlas-stick-curves> (дата обращения: 19.10.2022).
46. Field hockey stick // En-Academic. URL: <https://en-academic.com/dic.nsf/enwiki/3662902> (дата обращения: 19.10.2022).
47. TK Technology // TK-hockey. URL: <https://www.tk-hockey.com/en/technology> (дата обращения: 19.10.2022).
48. Клюшка для хоккея на траве – Field hockey stick // ВикиБриф. URL: https://ru.wikibrief.org/wiki/Field_hockey_stick (дата обращения: 19.10.2022).
49. HOW TO CHOOSE THE RIGHT FIELD HOCKEY STICK // HFS Sport. URL: <https://hfssport.com/blogs/blogs/how-to-choose-the-right-field-hockey-stick> (дата обращения: 19.10.2022).
50. Field hockey stick // Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Field_hockey_stick (дата обращения: 19.10.2022).

References

1. Gorbunova O. A., Prytkova E. S. Development of field hockey in Russia. *Igrovyye vidy sporta: aktual'nyye voprosy teorii i praktiki: sbornik statey III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Game sports: topical issues of theory and practice: digest of articles of III International scientific and practical conference]. Voronezh, 2020, pp. 292–295 (In Russian).
2. *Fizkultura i sport. Malaya entsiklopediya* [Physical culture and sport. Small encyclopedia]. Moscow, Raduga Publ., 1982. 376 p. (In Russian).
3. Fedotova E. V. *Khokkey na trave* [Field hockey]. Moscow, Fizicheskaya kul'tura i sport Publ., 2005. 279 p. (In Russian).
4. Galashev G. V. Stick for field hockey or indoor hockey. Patent RU 94868U1, 2010 (In Russian).

5. Field hockey. Available at: <http://ru.sport-wiki.org/vidy-sporta/hockey-na-trave/> (accessed 13.10.2022) (In Russian).
6. Hockey Stick Buying Guide. Available at: <https://www.allrounderhockey.com/hockey-stick-guide/> (accessed 13.10.2022).
7. Guillem Ribo Torres. Design of the supply chain for a new field hockey company in south america – Rio de Janeiro. Brazil, 2019. 82 p. (In Russian).
8. Everything for field hockey. Technical characteristics. Available at: <https://www.fihockey.ru/tehnicheskije-kharakteristiki-klyushek-dlya-khokkeya-na-trave> (accessed 13.10.2022) (In Russian).
9. Gurevich A. G. *Fizika tverdogo tela* [Solid state physics]. St. Petersburg, Nevskiy Dialect Publ., 2004. 320 p. (In Russian).
10. Rules of the sport. Field Hockey. Available at: <https://rulaws.ru/acts/Pravila-vida-sporta-hockey-na-trave> (accessed 13.10.2022) (In Russian).
11. Korolev V. A. *Hokkej na trave: tekhnicheskiye trebovaniya k sportivnomu oborudovaniyu, inventaryu i drugim sportivno-tekhnologicheskim sredstvam* [Field hockey: technical requirements for sports equipment, inventory and other sports and technological facilities]. Moscow, Sovetskiy sport Publ., 2012. 16 p. (In Russian).
12. FIH. Rules of Hockey including explanations. Switzerland, The International Hockey Federation, 2018. 67 p.
13. Ovchinnikov Yu. D. *Teoreticheskiye osnovy biomekhaniki dvizheniy* [Theoretical foundations of motion biomechanics. Textbook for students]. Krasnodar, KGUFKST Publ., 2014. 35 p. (In Russian).
14. How to pick the perfect field hockey stick. Available at: <https://www.harrodsport.com/advice-and-guides/hockey-stick-comparison> (accessed 03.10.2022).
15. Hockey sticks according to the height of the player. Available at: <https://hockeyarchives.ru/articles/kak-podobrat-klyushku-po-rostu.html> (accessed 03.10.2022) (In Russian).
16. Field Hockey Stick Buyers Guide. Available at: <https://www.sportsunlimitedinc.com/how-to-buy-a-field-hockey-stick.html> (accessed 04.10.2022).
17. Weight. Available at: https://www.sportsystems.ru/equip_hockey_manual_weight.html (accessed 03.10.2022) (In Russian).
18. How to choose the right field hockey stick. Available at: <https://www.anthem-sports.com/how-to-choose-the-right-field-hockey-stick> (accessed 03.10.2022).
19. Club choice. Available at: <https://hockeybezgranic.ru/khochu-igrat/vybor-klyushki> (accessed 03.10.2022) (In Russian).
20. Hockey stick buying guide. Available at: <https://www.grays-hockey.com/pages/hockey-stick-buying-guide> (accessed 03.10.2022).
21. Kuzmin M. A., Lebedev D. L., Popov B. G. *Raschety na prochnost' elementov mnogosloynnykh kompozitnykh konstruksiy* [Calculations for the strength of elements of multilayer composite structures]. Moscow, MGTU Publ., 2016. 344 p. (In Russian).
22. Materials. Available at: <https://www.fihockey.ru/materialy-klyushek-dlya-khokkeya-na-trave> (accessed 19.10.2022) (In Russian).
23. Ugolev B. N. *Drevesinovedeniye i lesnoye tovarovedeniye* [Wood science and forest commodity science]. Moscow, MGUL Publ., 2007. 351 p. (In Russian).
24. Takayuki F., Zun M., Ayumi M., Kenichi Yo. Prepreg, fiber reinforced composite material and prepreg production method Fujiwara. Patent RU 2509651C1, 2012 (In Russian).
25. Kashina S. G. *Zashchita ot vibratsii* [Vibration protection]. Kazan', Kazanskiy gosudarstvennyy arhitekturno-stroitel'nyy universitet Publ., 2012. 133 p. (In Russian).
26. Hockey stick. Available at: <https://www.encyclopedia.com/manufacturing/news-wires-white-papers-and-books/hockey-stick> (accessed 03.10.2022).
27. Moment of inertia. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Момент_инерции (accessed 03.10.2022) (In Russian).
28. Hockey Stick History. Available at: <http://www.madehow.com/Volume-4/Hockey-Stick.html> (accessed 03.10.2022).
29. Rod Cross. Introduction to the Physics of Hockey Sticks. Available at: https://twu.tennis-warehouse.com/learning_center/hockeyphysics.php (accessed 03.10.2022).
30. How to choose a stick. Available at: <https://snaryad.su/instrukcija-po-viboru-hokkejnoj-jekipirovki/kak-vibrat-klushku> (accessed 03.10.2022) (In Russian).
31. Stick stiffness. Available at: <https://www.sportdepo.ru/how-to-choose-a-product/choosing-the-stiffness-of-the-stick/> (accessed 19.10.2022)
32. Kuzmin M. A., Lebedev D. L., Popov B. G. *Prochnost', zhestkost', ustoychivost' elementov konstruksiy. Teoriya i praktikum. Raschety na prochnost' elementov mnogosloynnykh kompozitnykh*

konstruktsiy [Strength, rigidity, stability of structural elements. Theory and practice. Calculations for the strength of elements of multilayer composite structures]. Moscow, MGTU Publ., 2012. 341 p. (In Russian).

33. Field Hockey Stick. Available at: <https://www.dimensions.com/element/field-hockey-stick> (accessed 19.10.2022).

34. Klachkov V. E., Zinevich A. A., Matushevich O. S. *Teoriya i metodika sportivnoy podgotovki v izbrannom vide sporta* [Theory and methodology of sports training in the chosen sport]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet fizicheskoy kultury Publ., 2014. 597 p. (In Russian).

35. The shape of the impact part of the club (hook). Available at: <https://www.fihockey.ru/forma-udarnoi-chasti-klyushki-dlya-khokkeya-na-trave> (accessed 19.10.2022) (In Russian).

36. Field Hockey Stick. Available at: <https://sportsmatik.com/sports-corner/sports-equipage-detail/field-hockey-stick> (accessed 19.10.2022).

37. Pushkina E. A. Tactics in sports games. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Electronic scientific journal], 2016, no. 5, pp. 566–571 (In Russian).

38. How to choose a field hockey stick. Available at: <https://hockeyperformanceacademy.com/how-to-choose-a-field-hockey-stick/> (accessed 19.10.2022).

39. Stick innovation. Available at: <https://www.mazonhockey.com/pages/stick-technology> (accessed 19.10.2022).

40. Bend. Available at: https://www.sportsystems.ru/equip_hockey_manual_bow.html (accessed 19.10.2022) (In Russian).

41. Hockey stick buyers guide. Available at: <https://www.networldsports.co.uk/buyers-guides/hockey-stick-guide> (accessed 19.10.2022).

42. Info & Size Guide. Available at: <https://www.flickhockey.com/hockeyinfo/en/info-size-guide-hockey-sticks/> (accessed 19.10.2022).

43. Low bow or mid bow Hockey Stick. Available at: <https://hockeyhooked.com/low-bow-or-mid-bow-hockey-stick/> (accessed 19.10.2022).

44. Stick Guide. Available at: <https://planethockey.co.za/pages/stick-guide> (accessed 19.10.2022).

45. Atlas Stick Curves. Available at: <https://atlashockey.com.au/pages/atlas-stick-curves> (accessed 19.10.2022).

46. Field hockey stick. Available at: <https://en-academic.com/dic.nsf/enwiki/3662902> (accessed 19.10.2022).

47. TK Technology. Available at: <https://www.tk-hockey.com/en/technology> (accessed 19.10.2022).

48. Field hockey stick. Available at: https://ru.wikibrief.org/wiki/Field_hockey_stick (accessed 19.10.2022) (In Russian).

49. HOW TO CHOOSE THE RIGHT FIELD HOCKEY STICK. Available at: <https://hfssport.com/blogs/blogs/how-to-choose-the-right-field-hockey-stick> (accessed 19.10.2022).

50. Field hockey stick. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Field_hockey_stick (accessed 03.10.2022).

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 15.10.2022

УДК 674.817

**В. А. Кузьмин¹, Л. В. Радкевич¹, З. Пастори², И. К. Божелко³, И. Г. Федосенко³,
Л. Ю. Дубовская⁴, А. А. Коновалова³, О. В. Мелешко³**

¹Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

²Университет Шопрона, Венгрия

³Белорусский государственный технологический университет

⁴Белорусская государственная академия искусств

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОРЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ (ОБЗОР)

В этой статье обобщены некоторые результаты исследований и перспективы промышленного применения, связанные с корой деревьев. Кора деревьев является побочным продуктом лесного хозяйства и в настоящее время ее использование незначительно. Однако кора обладает хорошими физическо-механическими свойствами и доступна в больших количествах. Целью данного исследования являлся анализ возможности использования коры в качестве одного из компонентов теплоизоляционных материалов. Результаты анализа показывают, что теплоизоляционные материалы, изготовленные из коры, могут достигать коэффициента теплопроводности 0,042–0,065 Вт/(м·К). Улучшение теплоизоляционных свойств панелей может быть достигнуто за счет изменения качественного и количественного состава композиций, ориентации частиц и т. д. Армирование и термическая обработка коры дополнительно повышают устойчивость к поглощению воды и набуханию готовых изделий. Пористость и гидроксильные группы фенольных соединений, способных связывать формальдегид, обеспечивают экологичность использования продуктов из коры. Кроме того, за счет содержания в коре природных смол, термоизоляционные панели на ее основе могут быть изготовлены без использования связующих. Содержание цезия-137 в коре деревьев, произрастающих на загрязненных радионуклидами территориях, может быть уменьшено в 10 раз за счет добавления извести в композиции при изготовлении изделий. Кора деревьев обладает лучшими звукоизоляционными свойствами, чем ДСП и МДФ, ОСБ.

Ключевые слова: кора деревьев, свойства коры, использование коры, анализ коры, теплоизоляционные материалы.

Для цитирования: Кузьмин В. А., Радкевич Л. В., Пастори З., Божелко И. К., Федосенко И. Г., Дубовская Л. Ю., Коновалова А. А., Мелешко О. В. Использование коры в производстве теплоизоляционных строительных материалов (обзор) // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 177–186. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-19.

**V. Kuzmin¹, L. Radkevich¹, Z. Pásztor², I. Bazhelka³, I. Fedosenko³,
L. Dubovskaya⁴, A. Kanavalava³, V. Mialeshka³**

¹A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National Academy of Science of Belarus

²University of Sopron, Hungary

³Belarusian State Technological University

⁴Belarusian State Academy of Arts

USE OF BARK IN THE PRODUCTION OF THERMO INSULATING BUILDING MATERIALS (REVIEW)

This article summarizes some of the research results and industrial application prospects related to tree bark. Tree bark is a by-product of forestry and is currently of little use. However, the bark has good physical-mechanical properties and is available in large quantities. The purpose of this study was to analyze the possibility of using the bark as one of the components of thermal insulation materials. The results of the analysis show that thermal insulation materials made from bark can achieve a thermal conductivity coefficient of 0.042–0.065 W/(m·K). Improving the thermal insulation properties of panels can be achieved by changing the qualitative and quantitative composition of the compositions, particle orientation, etc. Reinforcement and heat treatment of the bark further increase the resistance to water absorption and swelling of finished products. The porosity and hydroxyl groups of phenolic compounds capable of binding formaldehyde ensure the environmental friendliness of the use of bark products. In addition, due to the content of natural resins in the bark, thermal insulation panels based on it can be made without the use of binders. The content of Cesium-137 in the bark of trees growing in areas contaminated with radionuclides can be reduced by 10 times by adding lime to the composition in the manufacture of products. The bark of trees has better soundproofing properties than chipboard and MDF, OSB.

Keywords: tree bark, bark properties, bark use, bark analysis, thermal insulation materials.

For citation: Kuzmin V., Radkevich L., Pásztor Z., Bazhelka I., Fedosenko I., Dubovskaya L., Kanavalava A., Mialeshka V. Use of bark in the production of thermo insulating building materials (review). *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 177–186. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-19 (In Russian).

Введение. Мировое годовое производство круглого леса по данным FAO Statistics в среднем за 2014–2018 годы оценивается в 3,9 млрд м³. Доля белорусского леса в этом объеме составляет менее 1%. Тем не менее если в среднем кора составляет около 10% от производимого круглого леса, то для нашей страны объемы отходов коры могут достигать до 2 млн м³/год.

Кора является отходом лесопереработки и образуется в процессе окорки – операции, которая осуществляется на всех типах лесопромышленных складов [1]. Сегодня в Беларуси те производства, у которых нет возможности перерабатывать отходы, вывозят кору в отвалы. Из обременительного отхода кора может стать экономически выгодным ресурсом благодаря содержанию в ней особых химических компонентов, уникальной структуры и физико-механических характеристик.

Согласно программе развития деревообрабатывающего и мебельного производства концерна «Беллесбумпром» на период до 2025 года, одним из стратегических направлений развития отрасли является повышение эффективности использования всей массы заготовленной древесины, включая древесные отходы. В данной статье обобщены результаты исследований по использованию коры в составе теплоизоляционных панелей. Эти результаты можно применить при создании устойчивого, экономически эффективного, деревоперерабатывающего комплекса.

Основная часть. Использование коры в качестве компонента теплоизоляционной плиты все еще находится на начальной стадии разработки. На кафедре ТДП БГТУ проводят лабораторные исследования, устанавливая оптимальный фракционный состав наполнителя и состав компонентов материала, допустимые размеры изделий [2] и т. д. Из литературных источников известно, что для производства теплоизоляционных плит применяются разные виды деревьев. Так, для использования в качестве наполнителя были исследованы свойства коры ели (*Picea abies*), сосны (*Pinus sylvestris*) и лиственницы (*Larix decidua*), собранных в Верхней Австрии и Зальцбурге [3], а также свойства коры криптомерии (*Cryptomeria japonica*) [4]. Определены основные характеристики коры ели черной (*Picea mariana*) и осины (*Populus tremuloides*), собранной в провинции Квебек, Канада [5]. Изучены физико-механические свойства волокон, полу-

ченных из коры эвкалипта (*Eucalyptus globulus*), произрастающего на территории Чили [6]. Исследованы теплофизические и акустические характеристики модифицированной коры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) из европейской части России [7].

Теплопроводность является важным параметром, влияющим на оценку использования коры в качестве теплоизоляционных материалов.

Теплоизоляционные свойства коры ели были определены при создании экспериментальной стены из ориентированно-стружечных плит, наполненных частицами коры размером 8–30 мм. Измерения показали, что кора ели обладает относительно низкой теплопроводностью и высокой теплоемкостью, что делает материал пригодным для вдуваемых изоляционных материалов [8].

Данилов В. и Айзенштадт А. в качестве засыпного теплозвукоизоляционного материала исследовали кору сосны обыкновенной, предварительно смешанную с базальтом. Коэффициент теплопроводности такого материала составил 0,0651 Вт/(м·К) [7].

В другом исследовании изучали влияние коэффициента теплопроводности прессованных панелей, изготовленных из хвойных и лиственных деревьев. Щепка коры лиственных пород имела меньшую теплопроводность. Самая низкая была у щепы коры белой акации – 0,0613 Вт/(м·К). Также на измельченной коре белой акации установили, что размер фракций незначительно влияет на коэффициент теплопроводности, например для самой мелкой фракции он составил 0,042 Вт/(м·К) [9].

Проведенные исследования показали, что существенное влияние на теплопроводность оказывает ориентация частиц коры в изделии. Прессованные теплоизоляционные плиты, изготовленные из коры лиственницы, сканировали при помощи промышленного рентгеновского компьютерного томографа. Было обнаружено, что панели с горизонтально ориентированными частицами имеют на 13% более низкую теплопроводность (статистически высоко значимая), чем панели с вертикально ориентированными частицами [10].

В работе [4] были определены теплоизоляционные свойства плит с наполнителем из коры криптомерии. Коэффициенты теплопроводности образцов крупной и мелкой фракций

составили 0,073 и 0,076 Вт/(м·К) соответственно. Для сравнения использовалась изоляционная плита из экструдированного полистирола STYROFOAM, теплопроводность которой составила 0,045 Вт/(м·К).

Физико-механические свойства. Волокон в коре гораздо меньше, чем в древесине, что влияет на прочность готовых изделий. Было изучено влияние вида, размера и содержания волокон в композитах, включающих кору осины, ели и полиэтилен высокой плотности, на показатели изгиба и растяжения образцов теплоизоляционных панелей. Несмотря на то, что показатели большинства исследованных механических свойств для полимерно-корьевого композита были ниже, чем для контрольного древесно-полимерного, все-таки некоторые из них, такие как прочность на растяжение и деформация при разрушении, были постоянно выше для композитов с корой по сравнению с композитами с древесиной [5].

Исследованы механические свойства изоляционных плит из частиц коры лиственницы (*Larix decidua* Mill.) [11], скрепленных таниновой смолой. Было установлено, что для выполнения требований соответствующего стандарта необходимо уплотнение наполнителя более 400 кг/м³.

При исследовании влияния ориентации частиц в композитах для изоляционных панелей на модуль разрыва и упругости установлено, что горизонтальная или вертикальная укладка частиц в панелях не оказывает на них существенного влияния [12].

С целью улучшения механических свойств изоляционных плит применяли термическую модификацию частиц коры и армирование, т. е. покрытие поверхности панелей, например, стекловолокном или бумагой.

Термическая модификация. Известно, что при термообработке улучшаются размерная стабильность и устойчивость к дереворазрушающим организмам, но снижаются некоторые прочностные свойства образцов [13]. На результаты, достигаемые во время термической обработки, влияют несколько переменных: порода деревьев, конструкция установки для термической модификации, продолжительность и температура обработки, варианты среды (окислительная, нейтральная или их смесь) [14–17].

В изоляционных панелях из коры, частицы которой предварительно термически обрабатывали в течение нескольких часов при температуре 180°C, модуль упругости и модуль разрыва увеличились на 100%, внутренняя связь на 27%, водопоглощение и набухание на 54 и 69% соответственно [18].

Армирование применяли для повышения прочности и жесткости средних слоев изоляционных плит на основе коры деревьев. Так, покрытие стекловолокном плит повлияло на физические свойства: относительную влажность, водопоглощение, разбухание [19]. Лучшие результаты механических свойств изоляционных плит, содержащих кору, были получены при комбинации коры, древесины (50%) и смолы [20].

Плотность. Известно, что плотность оказывает существенное положительное влияние на механические характеристики древесных плит, поскольку общепризнано, что чем выше плотность, тем выше механические свойства [11, 20]. Изоляционные плиты на основе коры толщиной 20 мм были изготовлены в соответствии с определенным начальным весом и заданной плотностью. При горячем прессовании плиты с заданной плотностью 350 кг/м³ имели среднее значение плотности 387,57 кг/м³, что почти на 11% было выше ожидаемого. Как и предполагалось, значения теплопроводности, а также свойства статического изгиба и внутреннего склеивания экспериментальных панелей были значительно увеличены за счет повышения плотности коры с 250 до 350 кг/м³. Плиты со средним значением плотности 250, 300 и 350 кг/м³ имели теплопроводность 0,059, 0,063 и 0,079 Вт/(м·К) соответственно [21].

Звукоизоляция. Исследование звукоизолирующей способности плиты, содержащей кору ели (с крупнозернистыми и мелкозернистыми частицами), показало, что она поглощает звук лучше, чем МДФ, ДСП или ОСП [22].

Экологичность. За счет ОН-групп фенольных соединений, содержащихся в составе коры деревьев, она может использоваться как поглотитель, например, формальдегида, при возможном загрязнении воздуха внутри помещений летучими органическими соединениями [23, 24]. Проведено всего несколько исследований, посвященных адсорбции формальдегида НСНО самой корой [25, 26]. Также было показано, что кора деревьев может быть использована в качестве биоиндикатора [27–29].

Кора различных пород деревьев эффективно используется для обнаружения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе [30]. Для эффективного извлечения таких веществ путем адсорбции хорошо подходит кора тополя [31]. Благодаря своей уникальной структуре, пористой природе и высокому содержанию дубильных веществ кора может быть перспективным адсорбирующим материалом. В основном реакционную способность проявляют суберин и конденсированные танины, являющиеся важными составляющими коры дерева, однако

присутствующие в коре другие компоненты субстрата (в разных пропорциях), такие как воски, терпены, флавоноиды, алкалоиды и т. д., проявляют некоторую сорбционную активность [32–36]. Танин в коре, имеющий различные типы флаван-3-оловых звеньев [37, 38], может реагировать с парами формальдегида [39, 40]. Кору тополя можно использовать в качестве поглотителя избытка формальдегида, когда она находится в составе плит, склеенных формальдегидными клеями. Проведены исследования, где было показано, что кора тополя *Pannónia* (*Populus Euramericana*) способна адсорбировать до 0,9 мг формальдегида на 1 г коры, при этом выбросы формальдегида составили 0,0036 мг/г, что значительно ниже, чем максимально возможное количество адсорбированного корой формальдегида [41]. В панелях, изготовленных из древесной стружки акации, добавление коры мимозы привело к снижению выделения панелями формальдегида [42]. Эксперимент показал, что присутствие коры в композите снижает выделение формальдегида в древесностружечных плитах, изготовленных из смеси коры ели (*Picea abies*) и сосны (*Pinus* sp.) с использованием карбамидоформальдегидной или меламиноформальдегидной смолы в основе клея [43].

Проведен ряд исследований, где в качестве связующего выступали естественные смолы коры деревьев. Более высокое содержание экстрактивных веществ в коре может способствовать связыванию частиц наполнителя вместе при прессовании коры под действием тепла [44]. Так, древесностружечные плиты были изготовлены из коры сосны без использования синтетических смол путем прессования при температуре до 230°C. Увеличение температуры прессования позволило повысить механические, физические и гигроскопические свойства изоляционных плит без введения связующих компонентов [45].

Обратной стороной экологичности использования коры деревьев, произрастающих на территории Республики Беларусь, может быть повышенное содержание радиоактивного нуклида цезия-137 ($Cs-137$), накапливающегося преимущественно в коре и верхних слоях древесины [46]. Департамент по ликвидации последствий катастрофы на чернобыльской АЭС сообщает, что зона радиоактивного загрязнения Беларуси на 2020 год составляла 16,3% общей площади страны. В контексте рассмотрения коры как экологичного вторичного ресурса это означает, что необходимо уделить внимание контролю и снижению $Cs-137$ в коре той древесины, которая произрастает в гомельской и могилевской областях. Снизить содержание $Cs-137$ в 10 раз в

плитах и панелях удалось при введении гипсового связующего с добавлением извести как редуцирующего агента [47]. Известно о нейтрализации радиоактивных изотопов в пищевой продукции способом вываривания [48–50]. Этот процесс можно использовать и при обработке коры деревьев, однако воду после такой варки необходимо будет удалять специальным образом, что становится нерентабельным.

Использование коры в конструкционных теплоизоляционных панелях позволит сохранить нейтральный баланс CO_2 в природе. Чтобы образовался 1 кг древесины, должно израсходоваться примерно 1,85 кг CO_2 , который непосредственно включается в состав биополимеров, составляющих клеточные стенки лигноволокна [51].

Кора как вторичный ресурс может быть использована и в других направлениях народного хозяйства, например в сельском хозяйстве, пробковом производстве, в очистке воды и газа, в производстве пластмасс и наполнителей, как биотопливо [52–53], однако ни одна сфера не позволяет использовать ее лучшие свойства так эффективно, как строительство.

Заключение. Кора деревьев является перспективным крупнотоннажным сырьем, сегодня мало используемым в промышленности. Анализ рассмотренных источников о возможностях применения коры в качестве теплоизоляционного строительного материала показал, что отдельным исследователям удалось использовать изоляционные свойства коры различных пород деревьев при изготовлении панелей для теплоизоляции зданий. Установлено, что теплопроводность таких панелей, полученных в лабораторных условиях, как правило, менее 0,06 Вт/(м·К). Физико-механические свойства будущего изоляционного материала можно корректировать под конкретные требования использования продукции. Температура обработки коры выше 200°C приводит к некоторым потерям в теплопроводности конечного материала, однако при этом остальные физические параметры будут более выгодными. Адсорбционные свойства коры деревьев определяют ее способность поглощать и связывать формальдегид как в твердых продуктах, так и при его наличии в атмосферном воздухе, а модификация состава композита известью позволяет снизить содержание $Cs-137$ в 10 раз в плитах и панелях.

Результаты показывают высокий потенциал применения коры деревьев, изделия из которой могут быть конкурентоспособными на рынке в качестве теплоизоляционного материала. Лабораторные испытания показывают возможность дальнейшего исследования для более широкого изучения свойств и особенностей использования коры деревьев.

Список литературы

1. Цывин М. М. Использование древесной коры. М.: Лесная пром-сть, 1973. 96 с.
2. Федосенко И. Г. Использование коры деревьев в производстве конструкционно-теплоизоляционных плит // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы докл. 84-й науч.-техн. конф., Минск, 3–14 февр. 2020 г. Минск, 2020. С. 78–79.
3. Tree bark insulation panels for special purpose insulation: Evaluation and discrete modeling of structure property relationships / G. Kain [et al.] // World Conference on Timber Engineering, Vienna, August 22–25, 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/311807447_Tree_bark_insulation_panels_for_special_purpose_insulation_Evaluation_and_discrete_modeling_of_structure_property_relationships (дата обращения: 10.10.2022).
4. Sato Y., Konishi T., Takahashi A. Development of insulation material using natural tree bark // Transactions of the Materials Research Society of Japan. 2004. Vol. 29, no. 5. P. 1937–1940. URL: https://www.mrs-j.org/pub/tmrj/vol29_no5/vol29_no5_1937.pdf (дата обращения: 10.10.2022).
5. Effect of bark fiber content and size on the mechanical properties of bark/HDPE composites / M. C. Ngucho Yemele [et al.] // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2010. Vol. 41, issue 1. P. 131–137. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.06.005.
6. New Biobased composite material using bark fibres Eucalyptus / C. Fuentealba [et al.] // Biocomp 2016: 13th Pacific Rim Bio-Based Composite Symposium, Concepción, Chile, November 13–15, 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/314240089_New_Biobased_composite_material_using_bark_fibres_Eucalyptus (дата обращения: 10.10.2022).
7. Данилов В. Е., Айзенштадт А. М. Использование модифицированной древесной коры сосны обыкновенной в качестве засыпной теплозвукоизоляции // Лесной журнал. 2019. Вып. 2. С. 111. DOI: 10.37482/0536-1036-2019-2-111.
8. Bark as Heat Insulation Material / G. Kain [et al.] // Bioresources. 2013. Vol. 8, issue 3. P. 3718–3731. DOI: 10.15376/biores.8.3.3718-3731.
9. Investigation of thermal insulation capacity of tree bark / Z. Pásztor [et al.] // Forestry engineering journal. 2017. Vol. 7, no. 1. P. 157–161. DOI: 10.12737/25206.
10. Evaluation of relationships between particle orientation and thermal conductivity in bark insulation board by means of CT and discrete modeling / G. Kain [et al.] // Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation. 2016. Vol. 6, part B. P. 21–29. DOI: 10.1016/j.csnst.2016.03.002.
11. Density related properties of bark insulation boards bonded with tannin hexamine resin / G. Kain [et al.] // European Journal of Wood and Wood Products. 2014. Vol. 72, issue 4. P. 417–424. DOI: 10.1007/s00107-014-0798-4.
12. Larch (*Larix decidua*) bark insulation board: interactions of particle orientation, physical–mechanical and thermal properties / G. Kain [et al.] // European Journal of Wood and Wood Products. 2018. Vol. 76, issue 2. DOI: 10.1007/s00107-017-1271-y.
13. Rowell R. M., Youngs R. L. Dimensional Stabilization of Wood In Use // Forest Service US. Department of Agriculture Forest Service, 1981. DOI: 10.2737/FPL-RN-243.
14. Rapp A. O. Review on heat treatments of wood // Proceedings of Special Seminar, Antibes, France, February 9, 2001. URL: https://projects.bre.co.uk/ecotan/pdf/Heat_treatment_processes_Andreas_Rapp%20.pdf (дата обращения: 10.10.2022).
15. Tjeerdsma B. F., Militz H. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood // Holz Als Roh- Und Werkstoff. 2005. Vol. 63, issue 2. P. 102–111. DOI: 10.1007/s00107-004-0532-8.
16. Esteves B. M., Pereira H. M. Wood modification by heat treatment: A review // Bioresources. 2009. Vol. 4, issue 1. P. 370–404. DOI: 10.15376/biores.4.1.370-404.
17. Navi P., Sandberg D. Heat Treatment. In: Thermo-hydrromechanical processing of wood // Wood Material Science & Engineering. 2013. Vol. 8, issue 1. P. 64–88. DOI: 10.1080/17480272.2012.751935.
18. Insulation Panels Made from Thermally Modified Bark / Z. Pásztor [et al.] // Acta Silvatica et Lignaria Hungarica. 2019. Vol. 15, no. 1. P. 23–34. DOI: 10.2478/aslh-2019-0002.
19. Thermal insulation panels from tree bark / Z. Pásztor [et al.] // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 1 (240). С. 141–149.
20. Blanchet P., Cloutier A., Riedl B. Particleboard made from hammer milled black spruce bark residues // Wood Science and Technology. 2000. Vol. 34, no 1. P. 11–19. DOI: 10.1007/s002260050003.
21. Pásztor Z., Borsok Z., Tsalagkas D. Density optimization for the manufacturing of bark-based thermal insulation panels // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Ho Chi Minh City, Vietnam, February 25–28, 2019. Vol. 307, 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/307/1/012007.

22. Sound-Absorption Coefficient of Bark-Based Insulation Panels / E. M. Tudor [et al.] // *Polymers*. 2020. Vol. 12, no. 5. 1012. DOI: 10.3390/polym12051012.
23. Law and features of TVOC and Formaldehyde pollution in urban indoor air / C. Chi [et al.] // *Atmospheric Environment*. 2016. Vol. 132. P. 85–90. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.02.043.
24. Field investigation on the removal of formaldehyde in indoor air / H. Plaisance [et al.] // *Building and Environment*. 2013. Vol. 70. P. 277–283. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.08.032.
25. Adsorption of formaldehyde on the Bark of *Larix kaempferi* / M. Funaki [et al.] // *Natural Medicines*. 2005. Vol. 58, issue 3. P. 104–108. URL: <https://dl.ndl.go.jp/pid/10760181/1/1> (дата обращения: 10.10.2022).
26. Formaldehyde adsorption by karamatsu (*Larix leptolepis*) bark / T. Takano [et al.] // *Wood Science*. 2008. Vol. 54, no. 4. P. 332–336. DOI: 10.1007/s10086-007-0940-6.
27. The use of tree bark for environmental pollution monitoring in the Czech Republic / P. Böhm [et al.] // *Environmental Pollution*. 1998. Vol. 102, issues 2-3. P. 243–250. DOI: 10.1016/S0269-7491(98)00082-7.
28. Elemental analyses of pine bark and wood in an environmental study / K. E. Saarela [et al.] // *Science of The Total Environment*. 2005. Vol. 343, issues 1-3. P. 231–241. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2004.09.043.
29. The application of tree bark as bio-indicator for the assessment of Cr(VI) in air pollution / K. L. Mandiwana [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. 2004. Vol. 137, issue 2. P. 1241–1245. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.04.015.
30. The utilization of tree bark / Z. Pásztor [et al.] // *Bioresources*. 2016. Vol. 11, issue 3. P. 7859–7888. DOI: 10.15376/biores.11.3.Pasztor.
31. Testing applicability of black poplar (*Populus nigra* L.) bark to heavy metal air pollution monitoring in urban and industrial regions / A. N. Berlizov [et al.] // *Science of The Total Environment*. 2007. Vol. 372, issues 2-3. P. 693–706. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2006.10.029.
32. Bianchi S. Extraction and characterization of bark tannins from domestic softwood species. PhD Thesis, University of Hamburg, 2017. URL: <https://d-nb.info/1126115967/34> (дата обращения: 10.10.2022).
33. Hathway D. E. Oak-bark tannins // *Biochemical Journal*. 1958. Vol. 70, issue 2. P. 34–42. DOI: 10.1042/bj0700034.
34. Kurth E. F. The Chemical Composition of Barks // *Chemical Reviews*. 1947. Vol. 40, issue 1. P. 33–49. DOI: 10.1021/cr60125a003.
35. Narasimhachari N., Rudloff E. V. The chemical composition of the wood and bark extractives of *Juniperus Horizontalis* Moench // *Canadian Journal of Chemistry*. 1961. Vol. 39, issue 12. P. 2572–2581. DOI: 10.1139/v61-339.
36. Condensed tannin reactivity inhibition by internal rearrangements: Detection by CP-MAS ¹³C NMR / P. Navarrete [et al.] // *Maderas. Ciencia y Tecnología*. 2011. Vol. 13, no. 1. P. 59–68. DOI: 10.4067/S0718-221X2011000100006.
37. Porter L. J. Structure and Chemical Properties of the Condensed Tannins // *Plant Polyphenols*. 1992. Vol. 59. P. 245–258. DOI: 10.1007/978-1-4615-3476-1_14.
38. Schofield P., Mbugua D., Pell A. Analysis of condensed tannins: a review // *Animal Feed Science and Technology*. 2001. Vol. 91, issues 1-2. P. 21–40. DOI: 10.1016/S0377-8401(01)00228-0.
39. Pizzi A. Tannin-based adhesives: new theoretical aspects // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 1980. Vol. 1, issue 1. P. 13–16. DOI: 10.1016/0143-7496(80)90028-7.
40. Pizzi A. Natural Phenolic Adhesives I. Handbook of Adhesive Technology, 2nd Edition. New York: Marcel Dekker, 2003. DOI: 10.1201/9780203912225.ch27.
41. Pásztor Z., Halasz K., Borcsok Z. Formaldehyde Adsorption–Desorption of Poplar Bark // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2019. Vol. 103, issue 5. P. 745–749. DOI: 10.1007/s00128-019-02718-7.
42. Nemli G., Gursel C. Effects of Mimosa Bark Usage on Some Properties of Particleboard // *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 2005. Vol. 29, no. 3. P. 227–230. URL: <https://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/vol29/iss3/10> (дата обращения: 10.10.2022).
43. Efficiency of bark for reduction of formaldehyde emission from particleboards / S. Medved [et al.] // *Wood research*. 2019. Vol. 64, no. 2. P. 307–315. URL: <http://www.woodresearch.sk/wr/201902/12.pdf> (дата обращения: 10.10.2022).
44. Harkin J. M., Rowe J. W. Bark and its possible uses // Forest Service US. Department of Agriculture Forest Service. 1971. Research note FPL, 091. P. 56. URL: <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/5760> (дата обращения: 10.10.2022).
45. Gupta G., Yan N., Feng M. Effects of Pressing Temperature and Particle Size on Bark Board Properties Made from Beetle-Infested Lodgepole Pine (*Pinus contorta*) Barks // *Forest Products Journal*. 2011. Vol. 61, issue 6. P. 478–488. DOI: 10.13073/0015-7473-61.6.478.

46. Радиоактивное загрязнение древесины Чернобыльской зоны / И. В. Турлай [и др.] // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 2001. № 2. С. 25–28. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/radioaktivnoe-zagryaznenie-drevesiny-chernobylskoj-zony> (дата обращения: 13.10.2022).

47. Федосенко И. Г. Применение коры деревьев в производстве изолирующих и конструкционных плит // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2020. № 2 (234). С. 239–243.

48. Steinhäuser G., Steinhäuser V. A. Simple and Rapid Method for Reducing Radiocesium Concentrations in Wild Mushrooms (*Cantharellus* and *Boletus*) in the Course of Cooking // Journal of Food Protection. 2016. Vol. 79, issue 11. P. 1995–1999. DOI: 10.4315/0362-028X.JFP-16-236.

49. Elution of Radioactive Cesium from Tofu by Water Soaking / M. Yoshida [et al.] // Food Safety. 2020. Vol. 8, issue 3. P. 55–58. DOI: 10.14252/foodsafetyfscj.D-20-00011.

50. Варфоломеева К. В. Варка сушеных грибов как эффективное средство снижения концентрации ^{137}Cs // Радиационная гигиена. 2019. № 12 (4). С. 82–88. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-82-88.

51. Zimmer B., Wegener, G. Stoff-und Energieflüsse vom Forst zum Sägewerk // Holz als Roh-und Werkstoff. 1996. No. 54. P. 217–223. DOI: 10.1007/s001070050171.

52. Состояние и перспективы использования древесной коры / З. Пастори [и др.] // Вестник МГУЛ. Лесной вестник. 2020. № 5. С. 74–88. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-i-perspektivy-ispolzovaniya-drevesnoy-kory> (дата обращения: 16.10.2022).

53. Gil L. Cork Composites: A Review // Materials. 2009. Vol. 2, issue 3. P. 776–789. DOI: 10.3390/ma2030776.

References

1. Tsyvin M. M. *Ispol'sovaniye drevesnoy kory* [The use of wood bark]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 96 p. (In Russian).

2. Fedosenko I. G. The use of tree bark in the production of structural and heat-insulating plates. *Lesnaya inzheneriya, materialovedeniye i dizayn: materialy dokladov 84-y nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Forest engineering, materials science and design: materials of reports of the 84th scientific and technical conference]. Minsk, 2020, pp. 78–79 (In Russian).

3. Kain G., Lienbacher B., Barbu M. C., Plank B., Richter K., Petutschnigg A. Tree bark insulation panels for special purpose insulation: Evaluation and discrete modeling of structure property relationships. *World Conference on Timber Engineering*, 2016. Available at: https://www.researchgate.net/publication/311807447_Tree_bark_insulation_panels_for_special_purpose_insulation_Evaluation_and_discrete_modeling_of_structure_property_relationships (accessed 10.10.2022).

4. Sato Y., Konishi T., Takahashi A. Development of insulation material using natural tree bark. *Transactions of the Materials Research Society of Japan*, 2004, vol. 29, no. 5, pp. 1937–1940. Available at: https://www.mrs-j.org/pub/tmrj/vol29_no5/vol29_no5_1937.pdf (accessed 10.10.2022).

5. Nguého Yemele M. C., Koubaa A., Cloutier A., Soulounganga P., Wolcott M. Effect of bark fiber content and size on the mechanical properties of bark/HDPE composites. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010, vol. 41, issue 1, pp. 131–137. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.06.005.

6. Fuentealba C., Montory J., Vega J., Norambuena-Contreras J. New Biobased composite material using bark fibres Eucalyptus. *Biocomp 2016: 13th Pacific Rim Bio-Based Composite Symposium*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/314240089_New_Biobased_composite_material_using_bark_fibres_Eucalyptus (accessed 10.10.2022).

7. Danilov V. E., Aizenshtadt A. M. The use of modified wood bark of Scots pine as backfill heat and sound insulation. *Lesnoy zhurnal* [Forest Journal], 2019, vol. 2, p. 111. DOI: 10.37482/0536-1036-2019-2-111 (In Russian).

8. Kain G., Barbu M. C., Hinterreiter S., Richter K., Petutschnigg A. Bark as Heat Insulation Material. *Bioresources*, 2013, vol. 8, issue 3, pp. 3718–3731. DOI:10.15376/biores.8.3.3718-3731.

9. Pasztory Z., Mohachine I., Gorbacheva G., Sanaev V. Investigation of thermal insulation capacity of tree bark. *Forestry engineering journal*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 157–161. DOI: 10.12737/25206.

10. Kain G., Lienbacher B., Barbu M. C., Plank B., Richter K., Petutschnigg A. Evaluation of relationships between particle orientation and thermal conductivity in bark insulation board by means of CT and discrete modeling. *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, 2016, vol. 6, part B, pp. 21–29. DOI: 10.1016/j.csndt.2016.03.002.

11. Kain G., Güttler V., Barbu M. C., Petutschnigg A., Richter K., Gianluca T. Density related properties of bark insulation boards bonded with tannin hexamine resin. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2014, vol. 72, issue 4, pp. 417–424. DOI: 10.1007/s00107-014-0798-4.

12. Kain G., Lienbacher B., Barbu M. C., Richter K., Petutschnigg A. Larch (*Larix decidua*) bark insulation board: interactions of particle orientation, physical-mechanical and thermal properties. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2018, vol. 76, issue 2. DOI: 10.1007/s00107-017-1271-y.
13. Rowell R. M., Youngs R. L. Dimensional Stabilization of Wood In Use. *Forest Service US. Department of Agriculture Forest Service*, 1981. DOI: 10.2737/FPL-RN-243.
14. Rapp A. O. Review on heat treatments of wood. *Proceedings of Special Seminar*, 2001. Available at: https://projects.bre.co.uk/ecotan/pdf/Heat_treatment_processes_Andreas_Rapp%20.pdf (accessed 10.10.2022).
15. Tjeerdsma B. F., Militz H. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. *Holz Als Roh- Und Werkstoff*, 2005, vol. 63, issue 2, pp. 102–111. DOI: 10.1007/s00107-004-0532-8.
16. Esteves B. M., Pereira H. M. Wood modification by heat treatment: A review. *Bioresources*, 2009, vol. 4, issue 1, pp. 370–404. DOI: 10.15376/biores.4.1.370-404.
17. Navi P., Sandberg D. Heat Treatment. In: Thermo-hydrromechanical processing of wood. *Wood Material Science & Engineering*, 2013, vol. 8, issue 1, pp. 64–88. DOI: 10.1080/17480272.2012.751935.
18. Pasztory Z., Tsalagkas D., Horvath N., Borcsok Z. Insulation Panels Made from Thermally Modified Bark. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 2019, vol. 15, no. 1, pp. 23–34. DOI: 10.2478/aslh-2019-0002.
19. Pasztory Z., Borcsok Z., Bazhelka I. K., Kanavalava A. A., Meleshko O. V. Thermal insulation panels from tree bark. *Trudy BGTU [Proceedings of BSTU]*, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2021, no. 1, pp. 141–149.
20. Blanchet P., Cloutier A., Riedl B. Particleboard made from hammer milled black spruce bark residues. *Wood Science and Technology*, 2000, vol. 34, no. 1, pp. 11–19. DOI: 10.1007/s002260050003.
21. Pásztor Z., Borcsok Z., Tsalagkas D. Density optimization for the manufacturing of bark-based thermal insulation panels. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/307/1/012007.
22. Tudor E. M., Dettendorfer A., Kain G., Barbu M. C., Reh R., Kristak L. Sound-Absorption Coefficient of Bark-Based Insulation Panels. *Polymers*, 2020, vol. 12, no. 5, 1012. DOI: 10.3390/polym12051012.
23. Chi C., Chen W., Guo M., Weng M., Yan G., Shen X. Law and features of TVOC and Formaldehyde pollution in urban indoor air. *Atmospheric Environment*, 2016, vol. 132, pp. 85–90. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.02.043.
24. Plaisance H., Blondel A., Desauziers V., Mocho P. Field investigation on the removal of formaldehyde in indoor air. *Building and Environment*, 2013, vol. 70, pp. 277–283. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.08.032.
25. Funaki M., Fukuta H., Nishizawa M., Yamagishi T. Adsorption of formaldehyde on the Bark of *Larix kaempferi*. *Natural Medicines*, 2005, vol. 58, pp. 104–108. Available at: https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_10760181_po_ART0009809557.pdf?contentNo=1&alternativ eNo= (accessed 10.10.2022).
26. Takano T., Murakami T., Kamitakahara H., Nakatsubo F. Formaldehyde adsorption by karamatsu (*Larix leptolepis*) bark. *Wood Science*, 2008, vol. 54, no. 4, pp. 332–336. DOI: 10.1007/s10086-007-0940-6.
27. Bohm P., Wolterbeek H., Verburg T., Musilek L. The use of tree bark for environmental pollution monitoring in the Czech Republic. *Environmental Pollution*, 1998, vol. 102, issues 2-3, pp. 243–250. DOI: 10.1016/S0269-7491(98)00082-7.
28. Saarela K.-E., Harju L., Rajander J., Lill J.-O., Heselius S.-J., Lindroos A. Elemental analyses of pine bark and wood in an environmental study. *Science of The Total Environment*, 2005, vol. 343, issues 1-3, pp. 231–241. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2004.09.043.
29. Mandiwana K. L., Resane T., Panichev N., Ngobeni P. The application of tree bark as bio-indicator for the assessment of Cr(VI) in air pollution. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, vol. 137, issue 2, pp. 1241–1245. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.04.015.
30. Pasztory Z., Mohacsine I., Gorbacheva G., Borcsok Z. The utilization of tree bark. *Bioresources*, 2016, vol. 11, issue 3, pp. 7859–7888. DOI: 10.15376/biores.11.3.Pasztory.
31. Berlizov A. N., Blum O. B., Filby R. H., Malyuk I. A., Tryshyn V. V. Testing applicability of black poplar (*Populus nigra* L.) bark to heavy metal air pollution monitoring in urban and industrial regions. *Science of The Total Environment*, 2007, vol. 372, issues 2-3, pp. 693–706. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2006.10.029.
32. Bianchi S. Extraction and characterization of bark tannins from domestic softwood species. *PhD Thesis, University of Hamburg*, 2017. Available at: <https://d-nb.info/1126115967/34> (accessed 10.10.2022).
33. Hathway D. E. Oak-bark tannins. *Biochemical Journal*, 1958, vol. 70, issue 2, pp. 34–42. DOI: 10.1042/bj0700034.
34. Kurth E. F. The Chemical Composition of Barks. *Chemical Reviews*, 1947, vol. 40, issue 1, pp. 33–49. DOI: 10.1021/cr60125a003.

35. Narasimhachari N., Rudloff E. V. The Chemical Composition of the wood and bark extractives of *Juniperus Horizontalis* Moench. *Canadian Journal of Chemistry*, 1961, vol. 39, issue 12, pp. 2572–2581. DOI: 10.1139/v61-339.
36. Navarrete P., Pizzi A., Bertaud F., Rigolet S. Condensed tannin reactivity inhibition by internal rearrangements: Detection by CP-MAS ¹³C NMR. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 2011, vol. 13, no. 1, pp. 59–68. DOI: 10.4067/S0718-221X2011000100006.
37. Porter L. J. Structure and Chemical Properties of the Condensed Tannins. *Plant Polyphenols*, 1992, vol. 59, pp. 245–258. DOI: 10.1007/978-1-4615-3476-1_14.
38. Schofield P., Mbugua D., Pell A. Analysis of condensed tannins: a review. *Animal Feed Science and Technology*, 2001, vol. 91, issues 1-2, pp. 21–40. DOI: 10.1016/S0377-8401(01)00228-0.
39. Pizzi A. Tannin-based adhesives: new theoretical aspects. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1980, vol. 1, issue 1, pp. 13–16. DOI: 10.1016/0143-7496(80)90028-7.
40. Pizzi A. Natural Phenolic Adhesives I. Handbook of Adhesive Technology. 2nd Edition. New York, Marcel Dekker, 2003. DOI: 10.1201/9780203912225.ch27.
41. Pásztor Z., Halász K., Börcsök Z. Formaldehyde Adsorption–Desorption of Poplar Bark. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2019, vol. 103, issue 5, pp. 745–749. DOI: 10.1007/s00128-019-02718-7.
42. Nemli G., Gursel C. Effects of Mimosa Bark Usage on Some Properties of Particleboard. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2005, vol. 29, no. 3, pp. 227–230. Available at: <https://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/vol29/iss3/10> (accessed 10.10.2022).
43. Medved S., Gajsek U., Tudor E. M., Barbu M. C. Efficiency of bark for reduction of formaldehyde emission from particleboards. *Wood research*, 2019, vol. 64, no. 2, pp. 307–315. Available at: <http://www.woodresearch.sk/wr/201902/12.pdf> (accessed 10.10.2022).
44. Harkin J. M., Rowe J. W. Bark and its possible uses. *Forest Service US. Department of Agriculture Forest Service*, 1971. Research note FPL, 091, 56 p. Available at: <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/5760> (accessed 10.10.2022).
45. Gupta G., Yan N., Feng M. Effects of Pressing Temperature and Particle Size on Bark Board Properties Made from Beetle-Infested Lodgepole Pine (*Pinus contorta*) Barks. *Forest Products Journal*, 2011, vol. 61, issue 6, pp. 478–488. DOI: 10.13073/0015-7473-61.6.478.
46. Turly I. V., Chernushevich G. A., Peretrukhin V. V., Tereshko V. V. Radioactive contamination of wood in the Chernobyl zone. *Izvestiya VUZov. Lesnoy zhurnal* [University news. Forest journal], 2001, no. 2, pp. 25–28. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/radioaktivnoe-zagryaznenie-drevesiny-chernobylskoy-zony> (accessed 13.10.2022) (In Russian).
47. Fedosenko I. G. Application of tree bark in the production of insulating and structural plates. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry, Nature Management and Processing of Renewable Resources, 2020, no. 2, pp. 239–243 (In Russian).
48. Steinhauser G., Steinhauser V. A Simple and Rapid Method for Reducing Radiocesium Concentrations in Wild Mushrooms (*Cantharellus* and *Boletus*) in the Course of Cooking. *Journal of Food Protection*, 2016, vol. 79, issue 11, pp. 1995–1999. DOI: 10.4315/0362-028X.JFP-16-236.
49. Yoshida M., Kaino H., Shidara S., Chiku K., Hachinohi M., Hamamatsu S. Elution of Radioactive Cesium from Tofu by Water Soaking. *Food Safety*, 2020, vol. 8, issue 3, pp. 55–58. DOI: 10.14252/foodsafetyfscj.D-20-00011.
50. Varfolomeeva K. V. Boiling dried mushrooms as an effective means of reducing the concentration of ¹³⁷Cs. *Radiatsionnaya gigiyena* [Radiation hygiene], 2019, no. 12 (4), pp. 82–88. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-82-88 (In Russian).
51. Zimmer B., Wegener G. Stoff-und Energieflüsse vom Forst zum Sägewerk. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 1996, no. 54, pp. 217–223. DOI: 10.1007/s001070050171.
52. Pastory Z., Gorbacheva G. A., Sanaev V. G., Mohacine I. R., Borchok Z. Status and prospects for the use of tree bark. *Vestnik MGUL. Lesnoy vestnik* [Bulletin of MSFU], 2020, no. 5, pp. 74–88. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-i-perspektivy-ispolzovaniya-drevesnoy-kory> (accessed 16.10.2022) (In Russian).
53. Gil L. Cork Composites: A Review. *Materials*, 2009, vol. 2, issue 3, pp. 776–789. DOI: 10.3390/ma2030776.

Информация об авторах

Кузьмин Владимир Алексеевич – кандидат технических наук, ведущий 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: kuzminva@tut.by

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

Пастори Золтан – доктор наук, профессор, заместитель декана факультета деревообработки и креативных производств. Университет Шопрона (9400, г. Шопрон, ул. Байчи-Жилински, 4, Венгрия). E-mail: pasztory.zoltan@uni-sopron.hu

Божелко Игорь Константинович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: bikbstu@mail.ru

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

Дубовская Людмила Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры интерьера и оборудования. Белорусская государственная академия искусств (220012, г. Минск, пр-т Независимости, 81а, Республика Беларусь). E-mail: luda.dubovskaya@tut.by

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

Мелешко Ольга Викторовна – аспирант кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: volhamialeshka@outlook.com

Information about the authors

Kuzmin Vladimir – PhD (Engineering), Leading 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: kuzminva@tut.by

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

Pásztory Zoltán – Doctor of Sciences, Professor, Vice dean of Faculty of Wood Engineering and Creative Industries. University of Sopron (Sopron, Bajcsy-Zsilinszky u. 4, 9400, Hungary). Email: pasztory.zoltan@uni-sopron.hu

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

Fedosenko Ivan – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ivan.fedosenko@mail.ru

Dubovskaya Lyudmila – PhD (Engineering), Associate Professor, Professor, the Department of Interior and Equipment. Belarusian State Academy of Arts (81a, Nezavisimosti Ave., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: luda.dubovskaya@tut.by

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

Mialeshka Volha – PhD student, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volhamialeshka@outlook.com

Поступила 20.10.2022

УДК 674.812:674.836

И. Г. Федосенко¹, М. И. Дребушевич²¹Белорусский государственный технологический университет²ОАО «Минскдрев»**ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ПЛИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ИЗ КОРЫ СОСНЫ НА МИНЕРАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ**

Целью исследования является выявление особенностей, требуемых для правильного конструирования плитных материалов из коры сосны на минеральных вяжущих. Достижение поставленной цели осуществляли посредством исследования влияния фракционного состава наполнителя, упрочняющих и уплотняющих структурных добавок, а также внешних упрочняющих покрытий.

Использование коры в качестве топлива не всегда удобно из-за высокой зольности и влажности, однако предприятия вынуждены утилизировать этот отход на своей территории. Решение поставленных вопросов найдено в этой работе. Кору предлагается использовать взамен древесной стружки и прочих органических наполнителей в производстве композиционных строительных материалов с минеральной матрицей в виде цементного и гипсового вяжущего.

Авторы изготавливали плитные материалы из коры с портландцементом и гипсом по разным рецептурам, определяли плотность, влажность, водо- и влагопоглощение, теплопроводность, прочность на изгиб, а также динамику поглощения. Также было исследовано, какое влияние добавки и упрочнители поверхности оказывают на механические свойства плит.

По результатам экспериментов были сделаны выводы. Рекомендовано для плит, имеющих изоляционное назначение, использовать более крупные частицы коры с условием максимального наполнения ими композита. Цемент в качестве вяжущего следует использовать для производства крупногабаритных изделий, эксплуатируемых в более агрессивных условиях, а гипс – для изделий небольших размеров, используемых внутри помещения. Добавление в конструкцию плит стекловолоконной сетки значительно увеличит несущую способность.

Ключевые слова: кора, цемент, гипс, плита, плотность, прочность, теплопроводность, влагопоглощение, водопоглощение.

Для цитирования: Федосенко И. Г., Дребушевич М. И. Особенности конструирования плитных материалов из коры сосны на минеральных вяжущих // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 187–193. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-20.

I. G. Fedosenko¹, M. I. Drebushevich²¹Belarusian State Technological University²OJSC “Minskdriv”**FEATURES OF CONSTRUCTION OF PLATE MATERIALS
FROM PINE BARK ON MINERAL BINDERS**

The aim of the study is to identify the features required for the correct construction of board materials from pine bark on mineral binders. Achieving this goal was carried out by studying the effect of the fractional composition of the filler, strengthening and sealing structural additives, as well as external hardening coatings.

The use of bark as fuel is not always convenient due to high ash content and humidity, however, enterprises are forced to dispose of this waste on their territory. The solution to the questions raised is found in this work. The bark is proposed to be used instead of wood shavings and other organic fillers in the production of composite building materials with a mineral matrix in the form of a cement and gypsum binder.

The authors made board materials from the bark with Portland cement and gypsum according to different recipes, determined the density, humidity, water and moisture absorption, thermal conductivity, bending strength, and absorption dynamics. It was also investigated what effect additives and surface hardeners have on the mechanical properties of the boards.

Based on the results of the experiments, conclusions were drawn. It is recommended for slabs with insulating purposes to use larger particles of bark with the condition of maximum filling of the composite with them. Cement as a binder should be used for the production of large-sized products operated in more aggressive conditions, and gypsum for small-sized products for indoor use. Adding fiberglass mesh to the slab construction will significantly increase the load-bearing capacity.

Keywords: bark, cement, gypsum, slab, density, strength, thermal conductivity, moisture absorption, water absorption.

For citation: Fedosenko I. G., Drebushevich M. I. Features of construction of plate materials from pine bark on mineral binders. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 187–193. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-20. (In Russian).

Введение. Сосна обыкновенная, или *Pinus sylvestris*, в Республике Беларусь составляет 54,8% лесного фонда заготавливаемой древесины. Переработка этой породы позволяет удовлетворить не только внутреннюю, но и экспортную потребность страны в древесине. При этом часто остается побочный продукт – кора, который не учитывается в расчетах потребителя с производителем сырья. Кора сосны достигает 7% объема круглой древесины в верхней части ствола и 14,4% в нижней [1]. Плотность коры также меняется по направлению от комля бревна к вершине – снижается от 496 до 735 кг/м³ в абсолютно-сухом состоянии [2].

При агрегатной обработке древесины или после переработки кусковых отходов в щепу присутствие коры не желательно. Она в обязательном порядке удаляется с пиловочных бревен для получения чистой измельченной древесины. Данное положение приводит к тому, что излишки этого бесплатного вторичного сырья постоянно скапливаются на предприятиях. Кора, удаляемая с заготовленного круглого леса, обладает повышенной влажностью и содержит значительное количество минеральных включений. Минеральные включения (песок) могут попадать в нее при заготовке и хранении, где она контактирует с почвой, при оседании поднимаемых и разносимых ветром пылевидных частиц на рельефной поверхности, а также в иных частных случаях. Как результат, зольность коры превышает 2%, что в ряде случаев, ограничивает использование коры в виде топлива. Влажность луба в 2–3 раза выше, чем корки. Так, кора в 1,5 раза толще луба в комле и в 5 раз тоньше у вершины сосны. Таким образом, из-за влияния более сухой корки общая влажность коры в вершине сосны достигает 150,4%, в то время как в комле в 2 раза ниже – только 75%. Но даже эта влажность делает нерентабельным использование коры в виде топлива, так как требуется тратить энергетические ресурсы на удаление воды из нее прежде чем использовать в качестве топлива или сырья для его получения.

Кора как внешняя оболочка является изолирующим слоем для растущего дерева. Это – кожа дерева. Изделия из кожи и меха животных прочно обосновались в обиходе человека, они создают барьер между телом и окружающим миром. Из кожи изготавливались доспехи, предохраняющее тело воинов от повреждения холодным оружием. А как насчет того, что и растения способны нам дать схожую защиту? Оказывается – могут.

Коэффициент теплопроводности сосновой коры при влажности 55–65% и плотности

480 кг/м³ составляет 0,09 Вт/(м·К). Этого вполне достаточно для изоляции жилых зданий.

Плитки из цельной коры [3] заменяют внешнюю отделку наружных стен. Причем такая обшивка не нуждается в специальном уходе и окраске, а производитель дает гарантию 30 лет на покрытие. Но такую кору можно заготовить лишь с растений, имеющих развитую лубяную прослойку и только при ручной окорке. На предприятиях кора после стволов деревьев является измельченным материалом и требует агломерирования. Соединение частичек коры между собой возможно как за счет растворимости или плавкости органических компонентов в ее составе, так и в результате введения клеевого или иного вяжущего [4].

Промышленно выпускается материал Expanded cork [5], который изготавливают исключительно из прочной и более ортотропной коры пробкового дуба, произрастающего в основном в Португалии. Пробка после измельчения поступает в закрытую термопрозрачную форму и сжимается в прессе. После подъема температуры выше 300°C в закрытой форме частички пробки как «попкорн» взрываются и в анаэробном состоянии высвобождают воскообразное вещество суберин, который необратимо связывает сжатые частички между собой. После остывания и снятия давления получается сплюснутый агломерат, который далее подвергают обрезке по формату.

Область применения пробковой плиты – утепление стен, полов, потолков, холодильников, труб, дверей. Они также используются для защиты от конденсата, пара и вибраций в конструкциях зданий и машин.

Характеристики такого материала приведены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства плит Expanded cork

Наименование, размерность	Значение
Размер плит, мм	1000×500×(10–150)
Размер листов, мм	1250×625×(10–40)
Коэффициент теплопроводности ($t_{cp} = 20^\circ\text{C}$), ккал/ч·м·°C	0,035
Нормальные рабочие температуры, °C	–200–110
Огнестойкость по DIN 4102	B2
При кипячении в воде в течение 3 ч.	Не распадается

Плиты из коры на основе клеевых связующих не обладают должной экологичностью из-за присутствия в их составе клеев, которые вредны либо при производстве, либо при эксплуатации. Кроме того, клеевая основа привносит в материал элемент текучести и потерю влагостойкости. Измельченная кора не обладает армирующими свойствами, поэтому она подмешивается к древесному волокну или стружке в процессе изготовления ДСтП или ДВП (МДФ, ХДФ). В качестве связующих выступают карбамидоформальдегидные, фенолформальдегидные, меламиноформальдегидные или изоцианатные клеи. Все они не дружат с экологией, и потому их использование в современных реалиях не конкурентно.

Материалы из коры на клеевом связующем лучше использовать в виде напыляемого покрытия или герметика для заполнения швов, как, например, Iso-Cork [6]. Подобное покрытие состоит из пробковой крошки и пигментов, а в качестве связующего используют акрилатные смолы. Такие смолы обладают большей экологической приемственностью, нежели термически отверждаемые.

Классические строительные материалы являются наиболее экологичными. Так, минеральные вяжущие способны создать матрицу в композите с корой и недопустить снижение экологичности материала. Такая концепция формирования изоляционных материалов и была принята для экспериментальных исследований.

Основная часть. Для получения композитных плит была взята измельченная кора сосны и выделены фракции с размером частиц 2–5 мм и 1–2 мм. В качестве вяжущего использовали портландцемент ПЦ-500Д0 (ЦЕМ-I-42,5Н) по ГОСТ 31108–2016 [7] и гипс строительный Г-4 по ГОСТ 125–2018 [8].

Во избежание появления пузырьков воздуха в смеси, значительно снижающих прочность гипсовых плит [9], в качестве добавки при изготовлении композиционных материалов был выбран пеногаситель Sofexil-520A (далее пеногаситель), производства ООО «СОФЭКС-Силикон» по ТУ 2251-011-42942526-00 с изм. 1–5.

Для дополнительного укрепления материала и возможности создания полноразмерных плит использована армирующая стекловолоконная сетка (далее сетка) по ГОСТ 3826–82 [10], крафт-бумага (далее бумага) по ГОСТ 8273–75 [11] или полипропиленовая фибра (далее фибра) по ГОСТ 14613–83 [12].

Кора с гипсом или цементом смешивались в сухом соотношении 7/3, 3/2, 1/1 и 45/55 по объему соответственно.

Для получения формовочной массы сухую смесь затворяли водой и снова перемешивали,

затем заполняли формы и, создавая вибрацию, уплотняли до полного распределения.

Сетка использовалась для плит на основе гипса и цемента, а бумага – только для плит на основе гипса. Этими материалами покрывались обе противоположные пласти образцов во время формования.

Для получения такой же смеси, но с добавлением пеногасителя, смешивание производилось аналогично предыдущему, но на этапе введения воды в нее был добавлен концентрированный раствор пеногасителя.

Добавление фибры происходило в момент сухого смешивания вяжущего и коры.

Форму со смесью закрывали крышкой и помещали под винтовой необогреваемый пресс, в котором происходила фиксация образца до схватывания. Для гипса время нахождения в закрытой форме составило 30 мин, для цемента – трое суток. После образцы освобождали от форм и выдерживали при температуре около 20°C в течение 30 дней до полного созревания вяжущего и кондиционирования плит.

Полученные плитки раскраивали по размеру для испытаний. Так, для определения теплопроводности получали плитки с гипсовым (рис. 1) и цементным (рис. 2) вяжущим размером по пласти 100×100 мм. Для сплошного контакта с датчиками плоскость образцов выравнивали шлифованием.



а



б

Рис. 1. Образцы с гипсовым вяжущим: а – фракция коры 2–5 мм; б – фракция коры 1–2 мм



а



б

Рис. 2. Образцы с цементным вяжущим:
а – фракция коры 2–5 мм; б – фракция коры 1–2 мм

Коэффициенты теплопроводности и термического сопротивления определяли с помощью прибора ИТП МГ-4.

Испытания плит на прочность проводили в соответствии с ГОСТ 26816–2016 [13]. Использовали испытательную машину MTS INSIGHT 100, имеющую автоматический контроль нагрузки и перемещения захватов.

Испытания плит на водо- и влагопоглощение проводились в соответствии с ГОСТ 10634–88 [14].

Результаты определения физико-механических свойств были сгруппированы для анализа и представлены в табл. 2–5.

Таблица 2

Характеристики плит, полученных из коры размером 2–5 мм и минерального вяжущего при соотношении 3/2 соответственно

Показатель	Гипс	Цемент
Плотность, кг/м ³	527	1134
Прочность на изгиб, МПа	0,776	2,074
Влагопоглощение, %	7,37	5,45
Водопоглощение, %	78,4	33,7
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,109	0,283
Начальная влажность, %	4,81	5,37

Таблица 3

Сравнение характеристик плит на основе цемента в зависимости от размеров коры и ее удельной доли в композите

Показатель	Размеры частиц коры, мм			
	2–5		1–2	
	Соотношение по объему кора/вяжущее в рабочем состоянии			
	7/3	3/2	1/1	45/55
Плотность, кг/м ³	974	1134	1110	1250
Прочность на изгиб, МПа	1,36	2,07	3,49	3,67
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,139	0,283	0,203	0,260
Начальная влажность, %	4,89	5,37	3,60	2,42

Таблица 4

Влияние добавок и армирующих покрытий на свойства плит из коры 2–5 мм и гипса при соотношении 3/2 соответственно

Показатель	Добавки		Армирующие покрытия	
	нет	Sofexil-520A	сетка	картон
Плотность, кг/м ³	527	501	–	–
Прочность на изгиб, МПа	0,776	0,295	2,019	1,719
Влагопоглощение, %	7,37	9,83	–	–
Водопоглощение, %	78,4	395,5	–	–
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,109	0,134	–	–
Начальная влажность, %	4,81	5,84	–	–

Таблица 5

Влияние добавок и армирующих покрытий на свойства плит из коры 2–5 мм и цемента при соотношении 3/2 соответственно

Показатель	Добавки			Сетка
	нет	Sofexil-520A	фибра	
Плотность, кг/м ³	1134	1183	–	–
Прочность на изгиб, МПа	2,074	2,405	0,339	2,348
Влагопоглощение, %	5,448	5,507	–	–
Водопоглощение, %	33,7	33,3	–	–
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,283	0,286	–	–
Начальная влажность, %	5,37	4,63	–	–

Анализируя данные табл. 2, можно заключить, что очевидным преимуществом цементных композитов являются механические свойства. Так, прочность при изгибе плит на цементном вяжущем в 2,7 раза превышает этот показатель для плит на гипсовом. Плотность плит на цементном вяжущем превышает в 2,2 раза плотность плит на гипсовом. При этом влагопоглощение плит с цементом ниже на 26%, а водопоглощение ниже в 2,3 раза. Однако теплопроводность цементных плит в 2,6 раза выше, чем гипсовых, что частично можно объяснить как плотностью вяжущего, так и самого композита. В данном случае хорошо видно, что потеря в теплоизоляционных свойствах полностью компенсируется увеличением прочности.

В табл. 3 видно, что с увеличением содержания коры в составе цементных плит всего на 10% (с 60 до 70%) их плотность снижается на 14,1%, прочность на изгиб – на 34,3%, а теплопроводность – примерно в 2 раза. Использование более мелкой фракции увеличивает плотность и прочность [15], но также увеличивает теплопроводность при тех же соотношениях компонентов. Это связано с более гомогенным распределением материалов в композите.

Как видно из табл. 4 и 5, добавка пеногасителя отрицательно сказалась на прочности плит из гипса (снижение в 2,6 раза), но дала наилучший эффект в плитах из цемента (увеличение на 16%). В гипсовом композите пеногаситель плохо показал себя по отношению к воде: влагопоглощение увеличилось в 1,3 раза, а водопоглощение и вовсе в 5 раз. Теплопроводность при этом увеличилась на 22,9%. В цементном композите пеногаситель не оказал влияние на отношение к воде и не изменил теплопроводность, следовательно, он только увеличил прочность.

Динамика водо- и влагопоглощения представлена графиками на рис. 3 и 4.

На рис. 3 видно, что поглощение воды как цементной, так и гипсовой композицией происходит быстрее в первые 3 суток контакта с водой, но после этого процесс заметно затухает. Плотность цементного вяжущего не позволяет идти процессу также интенсивно, как у гипса. Так, за полчаса гипсовые плиты набрали 70% от предела насыщения, в то время как цементные – 56%.

Поглощение влаги корьевыми плитами на минеральных вяжущих происходит несколько иным способом. Отчетливо видны две зоны. В первой идет медленное увлажнение, во второй – интенсивное и в третьей – увлажнение затухает. Время, характеризующее границы этих зон, – 1 сутки и 18 суток. Увлажнение цементной композиции происходит медленнее, чем гипсовой. Так, за полчаса цементные плиты набрали 3% от предела гигроскопичности, что в 2 раза ниже чем у гипсовых плит (6%).

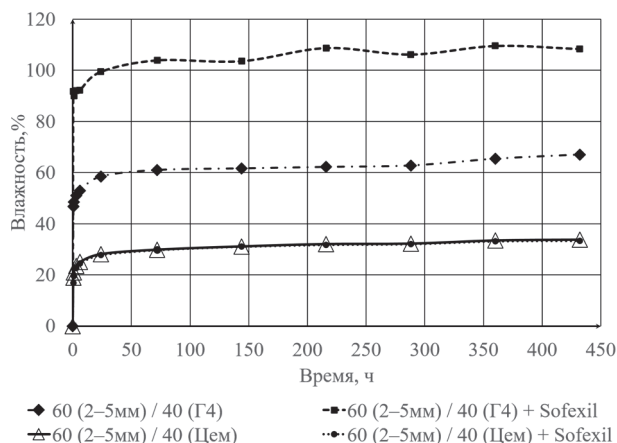


Рис. 3. Динамика водопоглощения образцами плит

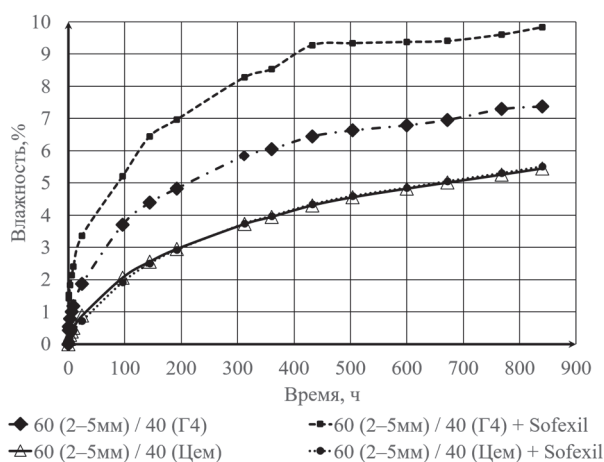


Рис. 4. Динамика влагопоглощения образцами плит

Использование фибры не помогло и без того наполненному на 60% корой композиту на цементном вяжущем и только ухудшило положение (снижение прочности на изгиб в 6 раз).

Сетка из стекловолокна увеличила прочность цементных плит на 13%, а гипсовых – в 2,6 раза, при том что крафт-бумага увеличила прочность гипсовых плит лишь в 2,2 раза.

Заключение. Исследования показали, что кора сосны может быть использована для создания теплоизоляционных плит в композиции как с цементом, так и с гипсом.

С целью увеличения теплоизоляционных свойств следует предпочесть более крупную фракцию коры с максимально возможным ее содержанием в композите. Однако необходимо помнить, что при этом снижается самонесущая способность плит и допустимые размеры изделий также снижаются.

Цементные композиты следует использовать для производства крупногабаритных изделий, эксплуатируемых в более агрессивных условиях, а гипсовые – для изделий небольших размеров для использования внутри помещения.

При использовании стекловолоконной сетки размеры изделий из гипса можно выбирать такие же, как из цемента при прочих равных условиях.

Пеногаситель Sofexil-520А использовать для гипсовых вяжущих нельзя, так как он увеличивает гидрофильность вяжущего после отверждения и снижает его прочность.

Для армирования поверхности плит из коры на минеральных вяжущих предпочтительно использовать стекловолоконную сетку, но для снижения себестоимости допустимо применение крафт-бумаги, также обеспечивающей значительный эффект.

Использовать дополнительные полимерные волокна в составе композиционного материала из коры на минеральных вяжущих опасно, однако в случае должной гомогенизации при смешивании возможно получить удовлетворительные результаты.

Руководящими правилами конструирования плитных материалов из коры сосны на минеральных вяжущих в первую очередь являются назначение и размеры плит. Эти факторы определяют минимально допустимые физико-механические характеристики, добиться которых можно при помощи подбора размеров частиц, типа минерального вяжущего, структурных и внешних упрочнителей.

Список литературы

1. Житков А. В. Утилизация древесной коры. М.: Лесная пром-ть, 1985. 136 с.
2. Вторичные материальные ресурсы лесной и деревообрабатывающей промышленности (образование и использование): справочник. М.: Экономика, 1983. 224 с.
3. Bark siding is the ultimate green-building material // Green Built Alliance. URL: https://www-greenbuilt-org.translate.google/articles/160-bark-siding-is-the-ultimate-green-building-material/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=sc (Дата обращения: 14.10.2022).
4. Цывин М. М. Использование древесной коры. М.: Лесная пром-ть, 1973. 96 с.
5. Wilton O., Howland M. B. Cork Construction Kit // *The Journal of Architecture*. 2020. No. 25:2. P. 138–165.
6. Vrbová P., Prokopová L. The Use of Thin-Layer Insulation Material in Technical Installations in Building Reconstructions // *Key Engineering Materials*. 2022. September. P. 253–259.
7. Цементы общестроительные: ГОСТ 31108–2016. М.: Стандартиформ, 2017. 18 с.
8. Вяжущие гипсовые. Технические условия: ГОСТ 125–2018. М.: Стандартиформ, 2019. 14 с.
9. Федосенко И. Г., Веретиков И. И. Применение коры деревьев в производстве изолирующих и конструкционных плит // *Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов*. 2020. № 2 (234). С. 239–243.
10. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками: ГОСТ 3826–82. М.: Изд-во стандартов, 1984. 12 с.
11. Бумага оберточная. Технические условия: ГОСТ 8273–75. М.: Изд-во стандартов, 1976. 8 с.
12. Фибра. Технические условия: ГОСТ 14613–83. М.: Изд-во стандартов, 1985. 28 с.
13. Плиты цементно-стружечные. Технические условия: ГОСТ 26816–2016. М.: Стандартиформ, 2018. 19 с.
14. Плиты древесностружечные. Методы определения физических свойств: ГОСТ 10634–88. М.: Изд-во стандартов, 1990. 10 с.
15. Федосенко И. Г., Усович А. В. Производственное планирование свойств древесных материалов на основе минеральных вяжущих // *Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов*. 2018. № 2 (210). С. 224–229.

References

1. Zhitkov A. V. *Utilizatsiya drevesnoy kory* [Recycling of tree bark]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1985, 136 p. (In Russian).
2. *Vtorichnyye material'nye resursy lesnoy i derevoobrabatyvayushchey promyshlennosti (obrazovaniye i ispol'zovaniye). Spravochnik* [Secondary material resources of the forestry and woodworking industry (education and use): directory]. Moscow, Ekonomika Publ., 1983. 224 p. (In Russian).
3. Bark siding is the ultimate green-building material. Available at: https://www-greenbuilt-org.translate.google/articles/160-bark-siding-is-the-ultimate-green-building-material/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=sc (accessed 14.10.2022).
4. Tsyvin M. M. *Ispol'zovaniye drevesnoy kory* [Use of tree bark]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 96 p. (In Russian).
5. Wilton O., Howland M. B. Cork Construction Kit. *The Journal of Architecture*, 2020, no. 25:2, pp. 138–165.
6. Vrbová P., Prokopová L. The Use of Thin-Layer Insulation Material in Technical Installations in Building Reconstructions. *Key Engineering Materials*, 2022, September, pp. 253–259.

7. GOST 31108–2016. General construction cements. Moscow, Standartinform Publ., 2017. 18 p. (In Russian).
8. GOST 125–2018. Gypsum binders. Specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 14 p. (In Russian).
9. Fedosenko I. G., Veretikov I. I. Application of tree bark in the production of insulating and structural plates. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature management. Processing of Renewable Resources, 2020, no. 2 (234), pp. 239–243 (In Russian).
10. GOST 3826–82. Wire mesh with square mesh. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1984. 12 p. (In Russian).
11. GOST 8273–75. Wrapping paper. Specifications. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1976. 8 p. (In Russian).
12. GOST 14613–83. Fiber. Specifications. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1985. 28 p. (In Russian).
13. GOST 26816–2016. Cement-bonded slabs. Specifications. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 2018. 19 p. (In Russian).
14. GOST 10634–88. Wood chip boards. Methods for determining physical properties. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1990. 10 p. (In Russian).
15. Fedosenko I. G., Usovich A. V. Production planning of the properties of wood materials based on mineral binders. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature management. Processing of Renewable Resources, 2018, no. 2 (210), pp. 224–229 (In Russian).

Информация об авторах

Федосенко Иван Гаврилович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии деревообработки. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Ivan.fedosenko@mail.ru

Дребушевич Маргарита Игоревна – инженер по качеству. ОАО «Минскдрев» (220102, г. Минск, ул. Социалистическая, 20, Республика Беларусь). E-mail: margarita_fedoruk@mail.ru

Information about the author

Fedosenko Ivan Gavriilovich – PhD (Engineering), Associate Professor, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Ivan.fedosenko@mail.ru

Drebushevich Margarita Igorevna – quality engineer. OJSC “Minskdrrev” (20, Sotsialisticheskaya str., 220102, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: margarita_fedoruk@mail.ru

Поступила 14.10.2022

УДК 674.812-419

О. К. Леонович, И. К. Божелко, О. В. Коняхина
Белорусский государственный технологический университет

СНИЖЕНИЕ ЭМИССИИ ФОРМАЛЬДЕГИДА ВОДОСТОЙКОЙ ФАНЕРЫ

В статье рассмотрены исследования, направленные на повышение экологической безопасности фанеры водостойкой и ее прочностных свойств. Приведены методики и результаты лабораторных исследований фанеры на основе карбамидоформальдегидной смолы с применением различных клеевых композиций и модификаций деполимеризованным гидролизным лигнином. Исследованы физико-механические свойства фанеры и эмиссия формальдегида. Экспериментальные значения испытаний фанеры, склеенной различными клеевыми композициями, обрабатывались и сравнивались между собой. По результатам определения класса эмиссии газоаналитическим методом выявлено действие продукта переработки лигнина как акцептора формальдегида в производстве плитной продукции. Достигнуто повышение физико-механических показателей лабораторных образцов, в частности предела прочности при скалывании по клеевому слою у фанеры, склеенной карбамидоформальдегидной смолой с добавкой деполимеризованного гидролизного лигнина. Снижена трудоемкость технологического процесса смешивания клеевой композиции в связи с заменой значительной доли сухих порошкообразных компонентов-наполнителей жидким деполимеризованным гидролизным лигнином, регулирующим однородность общей структуры. Предложенная технология формирования клеевой композиции позволяет производить дозирования компонента-наполнителя объемным методом взамен весового.

Ключевые слова: фанера, карбамидоформальдегидная смола, формальдегид, лигнин, эмиссия, прочность.

Для цитирования: Леонович О. К., Божелко И. К., Коняхина О. В. Снижение эмиссии формальдегида водостойкой фанеры // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 194–200. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-21

O. K. Leonovich, I. K. Bazhelka, O. V. Konyakhina
Belarusian State Technological University

REDUCED EMISSION OF FORMALDEHYDE WATER-RESISTANT PLYWOOD

In the article, the research is aimed at improving the environmental safety of waterproof plywood and its strength properties. Methods and results of laboratory studies of plywood based on urea-formaldehyde resin using various adhesive compositions and modifications with depolymerized hydrolytic lignin are presented. Physical and mechanical properties of plywood and formaldehyde emission have been studied. Experimental test values for plywood glued with various adhesive compositions were processed and compared with each other. Based on the results of determining the emission class by the gas analytical method, the effect of the lignin processing product as an acceptor of formaldehyde in the production of board products was revealed. An increase in the physical and mechanical parameters of laboratory samples was achieved, in particular, the tensile strength during chipping along the adhesive layer of plywood glued with urea-formaldehyde resin with the addition of depolymerized hydrolytic lignin. The labor intensity of the technological process of mixing the adhesive composition has been reduced due to the replacement of a significant proportion of dry powdered filler components with liquid depolymerized hydrolytic lignin, which regulates the uniformity of the overall structure. The proposed technology for forming the adhesive composition makes it possible to dose the filler component by volumetric method instead of by weight.

Keywords: plywood, urea-formaldehyde resin, formaldehyde, lignin, emission, strength.

For citation: Leonovich O. K., Bazhelka I. K., Konyakhina O. V. Reduced emission of formaldehyde water-resistant plywood. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (240), pp. 194–200. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-21 (In Russian).

Введение. Часть современной промышленности Республики Беларусь сосредоточена в лесном и лесоперерабатывающем секторе, где

огромная доля производимой продукции принадлежит клеевым материалам на основе карбамидоформальдегидных смол. Широкое при-

менение карбаминоформальдегидных смол в деревообрабатывающей промышленности обусловлено рядом преимуществ, прежде всего, это относительно простая технология производства и сравнительная дешевизна исходных материалов. Но наряду с достоинствами карбаминоформальдегидные смолы имеют ряд существенных недостатков, заключающихся в высокой эмиссии формальдегида из плит и невысокой водо- и теплостойкости их смоляных композиций. Поэтому улучшение свойств клеев на основе карбаминоформальдегидных смол является актуальной задачей и способствует продолжению исследовательских работ в данном направлении.

Особое внимание уделяется разработкам, направленным на снижение токсичности древесных материалов при сохранении высоких физико-механических характеристик. Для получения качественной конкурентоспособной продукции особое внимание необходимо уделять снижению токсичности древесных материалов, уменьшению расхода основных компонентов клея, разработке технологических процессов, обеспечивающих минимальную продолжительность склеивания при требуемой степени отверждения связующего. Эффективным способом создания таких клеев является наполнение и модификация синтетических смол.

ГОСТ 3916.1–2018 и DIN EN 13986–2015, EN 636–2015 требуют обеспечивать выпуск продукции с допустимой эмиссией формальдегида [1–3].

Введение различных модификаторов в клеящие составы на основе карбаминоформальдегидных смол позволяет улучшить технологические свойства клеев, а именно получить низкое содержание токсичных веществ, повысить прочность, надежность склеивания, тепло- и морозостойкость, водо- и атмосферостойкость древесных материалов. В Республике Беларусь огромное количество отходов гидролизного производства – технического гидролизного лигнина (более 7 млн). Решение вопроса утилизации и переработки является важнейшей экологической и экономической проблемой.

Приведенные в литературе материалы не позволяют предложить фанерной промышленности отработанные составы карбаминоформальдегидных смол, модифицированных гидролизным лигнином, и технологии для их применения, в народном хозяйстве [4–11].

Исходя из изложенного, решение проблемы использования отхода гидролизного производства для модификации карбаминоформальде-

гидных смол является актуальным и востребованным.

Целью исследования является получение прочной и экологически безопасной водостойкой фанеры с упрощением технологии приготовления клеевых композиций, а также снижение поглощения клеевой композиции в промежуточном периоде перед подпрессовкой и прессованием.

В связи с этим следует считать актуальной задачу исследования процесса изготовления низкоэмиссионной водостойкой фанеры с улучшенными физико-механическими характеристиками путем ее модификации лигнинсодержащими продуктами.

Основная часть. Для склеивания пятислойной водостойкой фанеры марки ФК были отобраны листы шпона по ГОСТ 3916.1–2018 [1] размером 320×320 мм и влажностью шпона $6 \pm 2\%$. Модификации подверглась карбаминоформальдегидная смола Primere 14F211 [12] с различными добавками, в том числе и с деполимеризованным гидролизным лигнином S-DrillTMBND 40, производимым СООО «СинерджиКом». Вязкость создаваемых клеевых композиций выдерживалась в пределах 140–150 с по ВЗ-4 при температуре $(20 \pm 0,5)^\circ\text{C}$. Норма расхода клея на 1 м^2 намазываемой поверхности шпона при изготовлении фанеры марки ФК 140–145 г/м². Склеивание пакетов шпона производится в автоматическом гидравлическом прессе ПСУ-50, который включает в себя два отдельных агрегата: собственно пресс и пульт управления. Прессование фанеры производится согласно технологическому режиму при заданной температуре $T = 125^\circ\text{C}$, давлении $p = 1,8\text{--}1,9 \text{ МПа}$, времени выдержки под прессом $t = 8,5 \text{ мин}$.

Для приготовления растворов клеев к смоле добавлялись различные модификаторы. К добавкам в виде порошка вводилась вода.

Исследованные рецептуры клеевых композиций представлены в табл. 1.

Одним из обязательных испытаний, регламентируемых ГОСТ 3916.1–2018 [1], является определение класса эмиссии формальдегида в образцах готовой продукции.

Отбор образцов для испытаний на эмиссию формальдегида проводили по методикам, изложенным в ГОСТ 27678–2014, ГОСТ 32155–2013 [13, 14], не ранее чем через 24 ч после изготовления материала.

Образец вырезают из середины листа размерами, мм: $(200 \pm 2) \times (50 \pm 2) \times 6$. Кромки образца заделывают алюминиевым скотчем.

Испытания проводятся в газовой камере GA-4m1E.nt. Выходящий из камеры воздушный

поток пропускается через устройство для выделения формальдегида из воздуха (импинджер). Основными элементами данного прибора являются две последовательно соединенные стеклянные колбы с дистиллированной водой, растворяющей содержащийся в атмосфере формальдегид.

Таблица 1
Рецептуры клеевых композиций

№ п/п	Наименование компонентов смолы	Масса добавки, г	Масса воды, г
1	Primere 14F211	62,3	3,15
	Карбамид	0,38	
	Сульфат аммония	0,45	
	Каолин	5,3	
	Лигносульфонат	3,2	
	Мел	0,23	
2	Primere 14F211	75,0	–
	Хлористый аммоний	0,9	
3	Primere 14F211	75,0	–
	S-Drill TM BND 40	2,4	
4	Primere 14F211	75,0	–
	S-Drill TM BND 40	4,0	
5	Primere 14F211	62,3	3,15
	Карбамид	0,38	
	Сульфат аммония	0,45	
	Каолин	5,3	
	BND 40	3,2	
	Мел	0,23	
6	Primere 14F211	75,0	–
	S-Drill TM BND 40	4,0	
	Хлористый аммоний	1,0	
7	Primere 14F211	74,0	–
	S-Drill TM BND 40	4,0	
	Пенообразователь	1,0	

Поглощательную способность растворов определяли фотометрическим способом при длине волны 412 нм и толщине слоя 50 мм в сравнении с дистиллированной водой с помощью спектрофотометра ПЭ-5300 ВИ. Содержание формальдегида (C_i , мкг) в каждой колбе с поглотительным раствором (т. е. для каждого часового периода испытаний) определяли по измеренной оптической плотности раствора, используя калибровочный график, или вычисляли с использованием калибровочных коэффициентов. За результат испытания было принято среднеарифметическое значение почасовых измерений.

Выделение формальдегида в первый час в ходе испытания учитывали только в случае его максимального значения в данном испытании.

Синергетическое взаимодействие смолы и модифицированного лигнина обеспечило снижение эмиссии формальдегида.

В испытании на определение выделения формальдегида все образцы показали результаты, соответствующие классу эмиссии E0,5 по ГОСТ 3916.1–2018 [1]. Добавка модифицированного гидролизного лигнина S-Drill TM BND 40 в 4%-ной концентрации по сухим остаткам к смоле Primere 14F211 работает как отвердитель и акцептор формальдегида и показывает наилучшие результаты. Добавка пенообразователя в эту композицию обеспечила снижение вязкости, повысила жизнеспособность, уменьшила поглощение клеевой композиции. В результате повысилось среднее значение предела прочности при скалывании и составило 3,9 МПа, что в 1,5 раза выше показателя при сравнении с составом № 1, содержащим сухие добавки карбамида, сульфата аммония, каолина, лигносульфоната и мела.

Наименьшее почасовое выделение формальдегида 0,2 G_i , мг/м², происходило у образца под № 7 (табл. 2), содержащего 74% смолы Primere 14F211, 35% раствора модифицированной добавки S-Drill TM BND 40 с 4% по сухим остаткам и 1% пенообразователя. Кроме того, уменьшилась норма расхода смолы на каждый метр квадратный поверхности шпона.

Для определения предела прочности при скалывании применяют испытательную машину по ГОСТ 28840–90 для проведения испытаний на растяжение, оборудованную клиновыми захватами с нарезанными на них мелкими зубьями, способную работать непрерывно и измерять нагрузку с точностью $\pm 1\%$.

По длине образцы должны соответствовать направлению волокон древесины наружных слоев, не иметь каких-либо видимых дефектов в зоне скалывания. Длина образца $l = 135$ мм; длина плоскости скалывания $l_1 = (25 \pm 0,5)$ мм; минимальное расстояние между зажимами $l_2 = 50$ мм; ширина плоскости скалывания (ширина образца для испытаний) $b_1 = (25 \pm 0,5)$ мм; ширина пропилов $b_2 = 2,5–4$ мм.

Скалывание образцов проводят по наиболее удаленным от наружных слоев клеевым слоям образца. Испытания проводят на образцах, прошедших специальную влажностную обработку: выдерживание в воде в течение 24 ч.

Предел прочности при скалывании определяли по ГОСТ 9624–2009 [15].

Отбор образцов и подготовку их к испытаниям проводили по ГОСТ 9620–94 [16].

В процессе испытаний на скалывание для каждого образца всех видов продукции фиксировали разрушающую нагрузку, а для образцов фанеры и фанерных плит – дополнительно степень разрушения по древесине посредством сравнения плоскости скалывания со стандартными значениями когезионного разрушения древесины в зоне скалывания с точностью до $\pm 10\%$.

Таблица 2
Результат показателей содержания и выделения формальдегида в образцах фанеры

№ п/п	Состав композиции	Среднее содержание формальдегида C_i , мкг	Почасовое выделение формальдегида G_i , мг/м ²
1	Primere 14F211 Карбамид Сульфат аммония Каолин Лигносульфонат Мел	0,0045	0,90
2	Primere 14F211 Хлористый аммоний	0,004	0,08
3	Primere 14F211 S-Drill TM BND 40 (2,4)	0,003	0,05
4	Primere 14F211 S-Drill TM BND 40 (4,0)	0,0015	0,03
5	Primere 14F211 Карбамид Сульфат аммония Каолин BND 40 Мел	0,0025	0,05
6	Primere 14F211 S-Drill TM BND 40 Хлористый аммоний	0,003	0,06
7	Primere 14F211 S-Drill TM BND 40 Пенообразователь	0,0014	0,02

Среднее значение предела прочности при скалывании определенной пары клеевых швов для каждой группы образцов \bar{X}_j , МПа, вычисляли по формуле. В результате проведения испытаний были получены следующие результаты, приведенные в табл. 3.

Анализ результатов, которые были получены в ходе проведения испытаний предела прочности при скалывании образцов по клеевому слою, показывает влияние модификаторов клеевых композиций на способность плитного материала воспринимать разрушающую нагрузку. При использовании карбамида в качестве акцептора формальдегида сопутствующим фактором является снижение физико-механических свойств. Альтернативное использование лигнинсодержащего реагента с целью снижения эмиссии формальдегида позволяет получить достаточно высокие значения предела прочности.

В результате испытаний на скалывание получили, что все образцы соответствуют нормативным показателям ($\geq 1,00$ МПа). При этом образцы, изготовленные с применением кле-

вой композиции, в составе которой технический лигносульфонат заменен на деполимеризованный гидролизный лигнин S-Drill TM BND 40, производимый ООО «Синерджи», образец № 7 (табл. 3), включающий 74% смолы Primere 14F211, 35% раствора модифицированной добавки S-Drill TM BND 40 с 4% по сухим остаткам и 1% пенообразователя, имеют самый высокий показатель прочности. Образец, в клеевой композиции которого все наполнители заменены на лигнинсодержащий компонент и добавлен пенообразователь, имеет высокий показатель предела прочности, что дает возможность снизить себестоимость готовой продукции, заменив компоненты в составе клеевой композиции, а также уменьшить трудоемкость операции приготовления клея.

Таблица 3
Результат показателей предела прочности при скалывании клеевого шва

№ п/п	Наименование образца	Среднее значение предела прочности при скалывании \bar{X}_j , МПа
1	Primere 14F211 Карбамид Сульфат аммония Каолин Лигносульфонат Мел	2,45
2	Primere 14F211 Хлористый аммоний	2,5
3	Primere 14F211 S-Drill TM BND 40 (2,4)	2,93
4	Primere 14F211 S-Drill TM BND 40 (4,0)	3,8
5	Primere 14F211 Карбамид Сульфат аммония Каолин BND 40 Мел	3,41
6	Primere 14F211 S-Drill TM BND 40 Хлористый аммоний	1,87
7	Primere 14F211 S-Drill TM BND 40 Пенообразователь	3,9

Снижена трудоемкость технологического процесса смешивания клеевой композиции в связи с заменой значительной доли сухих порошкообразных компонентов-наполнителей жидким деполимеризованным гидролизным лигнином, регулирующим однородность общей структуры. Предложенная технология формирования клеевой композиции позволяет производить

дозирование компонента-наполнителя объемным методом взамен весового.

Заключение. Использование деполимеризованных гидролизных лигнинов для модификации карбамидоформальдегидных смол позволяет не только значительно уменьшить эмиссию формальдегида выпускаемой продукции, но и увеличить ее физико-механические показатели, что позволит расширить область применения производимой водостойкой фанеры в производстве мебели, вагоно- и машиностроении, строительной и других отраслях народного хозяйства.

Модифицированные гидролизные лигнины могут быть использованы в фанерном производстве в качестве альтернативы сухим лигносульфонатам при изготовлении фанеры марки ФК.

Модифицированные гидролизные лигнины в составе клеевых композиций снижают эмиссию формальдегида. Так, у композиции № 7 (табл. 3) почасовое выделение формальдегида G_i составило $0,02 \text{ мг/м}^2$, а у используемой в настоящее время композиции, содержащей смолу Primere 14F211, карбамид, сульфат аммония, каолин, лигносульфонат и мел, $G_i = 0,9 \text{ мг/м}^2$.

Деполимеризованные гидролизные лигнины при добавлении их в карбамидоформальде-

гидную смолу увеличивают предел прочности при скалывании по клеевому слою.

Композиция № 7 (табл. 3), в составе которой технический лигносульфонат заменен на деполимеризованный гидролизный лигнин S-Drill TM BND 40 имеет самый высокий показатель предела прочности при скалывании, равный $3,9 \text{ МПа}$, что на $1,6$ раза выше, чем у композиции, содержащей смолу Primere 14F211, карбамид, сульфат аммония, каолин, лигносульфонат и мел.

Добавка модифицированного гидролизного лигнина S-Drill TM BND 40 в 4%-ной концентрации по сухим остаткам к смоле Primere 14F211, а также композиция, содержащая эти же компоненты плюс пенообразователь, работают как отвердитель и акцептор формальдегида, причем технология приготовления клеевой композиции сокращается.

Добавление к композиции смолы с деполимеризованными лигнинами пенообразователя стабилизирует клеевую композицию, увеличивает срок ее жизнедеятельности и позволяет применять ее при технологии склеивания фанеры, предусматривающей подпрессовку.

Список литературы

1. Фанера общего назначения с наружными слоями из шпона лиственных пород. Технические условия: ГОСТ 3916.1–2018. М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2018. 16 с.
2. Древесные плиты для использования в строительстве. Характеристики, оценка соответствия и маркировка: DIN EN 13986–2015. М.: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2015. 72 с.
3. Фанера. Технические характеристики: EN 636–2015. М.: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2015. 21 с.
4. Разработка технологии модификации карбамидоформальдегидных смол / Д. А. Перминова [и др.] // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2015. № 1. С. 159–162.
5. Снижение токсичности древесных клеевых материалов на основе модифицированных лигносульфонатами карбамидоформальдегидных смол / Г. С. Варанкина [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 3 (31). С. 154–160. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-3-154-160.
6. Бельчинская Л. И. Адсорбция формальдегида активированными наполнителями // Студенческие реферативные статьи и материалы. URL: https://studref.com/558157/tehnika/napolniteli_karbamidoformaldegidnyh_smol_razlichnoy_prirody (дата обращения: 23.03.2022).
7. Синтез карбамидоформальдегидных смол с пониженным содержанием формальдегида / Д. В. Кузёмкин [и др.] // Нефтехимия – 2021: материалы IV Междунар. науч.-техн. форума по хим. технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 22–24 нояб. 2021 г. Минск, 2021. С. 40–43.
8. Исследование свойств фанеры на основе модифицированных клеевых составов и шпона / А. И. Криворотова [и др.] // Древесные плиты и фанера: теория и практика: сб. материалов XXIV Всерос. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 17–18 марта 2021 г. СПб., 2021. С. 98–101.
9. Варанкина Г. С., Чубинский А. Н. Снижение токсичности древесных плитных материалов // ЛесПромИнформ. URL: <http://lesprominform.ru/jarticles.html?id=2166> (дата обращения: 20.03.2022).
10. Ремизова Л. А., Иванова А. В. Активация гидролизного лигнина как модифицирующего компонента карбамидоформальдегидных связующих // Scientific World. URL: <https://www.sworld.com.ua>89.PDF> SWorld – 21–30 April 2015 (дата обращения: 20.03.2022).
11. Способ снижения формальдегида в карбамидоформальдегидных смолах: пат. RU 2441031 / Э. Н. Шалфеева, А. Ф. Фёдоров, П. М. Лукин, Опубл. 27.01.2012.
12. Смола карбамидоформальдегидная марка «Primere 14F». Технические условия: ТУ 2223-014472149825–2014. Орехово-Зуево: Метадинея, 2015. 12 с.

13. Плиты древесные и фанера. Перфораторный метод определения содержания формальдегида: ГОСТ 27678–2014. М.: Лессертика, 2014. 16 с.

14. Плиты древесные и фанера. Определение выделения формальдегида методом газового анализа: ГОСТ 32155–2013. М.: Лессертика, 2013. 11 с.

15. Древесина слоистая клееная. Отбор образцов и общие требования при испытании: ГОСТ 9620–1994. М.: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1994. 8 с.

16. Древесина слоистая клееная. Метод определения предела прочности при скалывании: ГОСТ 9624–2009. М.: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2009. 12 с.

References

1. GOST 3916.1–2018. General purpose plywood with hardwood veneer outer layers. Specifications Moscow, STANDARTINFORM Publ., 2018. 16 p. (In Russian).

2. DIN EN 13986–2015. Wood boards for use in construction. Characteristics, conformity assessment and marking. Minsk, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification Publ., 2015. 72 p. (In Russian).

3. DIN EN 636–2015. Plywood. Minsk, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification Publ., 2015. 21 p. (In Russian).

4. Perminova D. A., Malkov V. S., Knyazev A. S., Dakhnavi E. M. Development of technology for modifying urea-formaldehyde resins. *Vestnik Kazanskogo technologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2015, no. 1, pp. 159–162 (In Russian).

5. Varankina G. S., Rusakov D. S., Ivanova A. V., Ivanov A. M., Kirov S. M. Reducing the toxicity of wood glued materials based on urea-formaldehyde resins modified with lignosulfonates. *Sistemy. Metody. Teknologii* [Systems. Methods. Technology], 2016, no. 3 (31), pp. 154–160. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-3-154-160 (In Russian).

6. Belchinskaya L. I. Adsorption of formaldehyde by activated fillers. Available at: https://studref.com/558157/tehnika/napolniteli_karbamidoformaldegidnyh_smol_razlichnoy_prirody (accessed 23.03.2022) (In Russian).

7. Kuzemkin D. V., Yusevich A. I., Shishakov E. P., Dubodelova E. V., Kovalevsky A. S., Akimov A. V., Gonchar A. N. Synthesis of urea-formaldehyde resins with reduced formaldehyde content. *Neftekhimiya – 2021: materialy IV Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma po khimicheskim tekhnologiyam i neftegazoperebotke* [Petrochemistry – 2021: materials of the IV International scientific and technical forum on chemical technologies and oil and gas processing]. Minsk, 2021, pp. 40–43 (In Russian).

8. Krivorotova A. I., Orlov A. A., Zaeva A. A., Manzhula V. O. Study of the properties of plywood based on modified adhesive compositions and veneer. *Drevesnyye plity i fanera: teoriya i praktika: sbornik materialov XXIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Wood boards and plywood: theory and practice: collection of materials XXIV of the All-Russian Scientific and Practical Conference], St. Petersburg, 2021, pp. 98–101 (In Russian).

9. Varankina G. S., Chubinsky A. N. Reducing the toxicity of wood-based board materials. Available at: <http://lesprominform.ru/jarticles.html?id=2166> (accessed 20.03.2022) (In Russian).

10. Remizova L. A., Ivanova A. V. Activation of hydrolytic lignin as a modifying component of urea-formaldehyde binders. Available at: <http://lesprominform.ru/jarticles.html?id=2166> (accessed 20.03.2022) (In Russian).

11. Shalfeeva E. N., Fedorov A. F., Lukin P. M. Method for reducing formaldehyde in carbamidoformaldehyde resins. Patent RU 2441031, 2012 (In Russian).

12. TU 2223-014472149825–2014. Resin urea-formaldehyde brand “Primere 14F”. Orekhovo-Zuyevo, Metadineya Publ., 2015. 12 p. (In Russian).

13. GOST 27678–2014. Wood boards and plywood. Perforator method for determining the content of formaldehyde. Moscow, Lessertika Publ., 2014. 16 p. (In Russian).

14. GOST 32155–2013. Wood boards and plywood. Determination of formaldehyde emission by gas analysis method. Moscow, Lessertika Publ., 2013. 11 p. (In Russian).

15. GOST 9620–1994. Laminated glued wood. Sampling and general requirements for testing. Minsk, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification Publ., 1994. 8 p. (In Russian).

16. GOST 9624–2009 Laminated glued wood. Method for determining the shear strength limit. Moscow, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification Publ., 2009. 12 p. (In Russian).

Информация об авторах

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

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

Коняхина Ольга Вадимовна – магистрант кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: ikarija88@mail.ru

Information about the authors

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

Bazhelka Igar Kanstantinavich – 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

Konyakhina Olga Vadimovna – Master's degree student, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ikarija88@mail.ru

Поступила 15.10.2022

ОБЩЕИНЖЕНЕРНЫЕ ВОПРОСЫ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА ALL-ENGINEERING QUESTIONS OF TIMBER PROCESSING COMPLEX

УДК 613.2-046.55

Р. А. Чарнушэвіч, А. У. Дамнянкова, С. У. Кісялёў, Н. А. Азоўская
Беларускі дзяржаўны тэхналагічны ўніверсітэт

АСАБЛІВАСЦІ АРГАНІЗАЦЫІ ХАРЧАВАННЯ НАСЕЛЬНІЦТВА ВА ЁМОВАХ ПАВЫШАНАЙ РАДЫЯЦЫЙНАЙ РЫЗЫКІ

Праведзены аналіз фактараў, якія ўплываюць на фарміраванне доз унутранага апраменьвання насельніцтва Беларусі, пражываючага на забруджаных радыёнуклідамі тэрыторыях.

На паступленне і назапашванне радыёнуклідаў у арганізме чалавека аказваюць уплыў асаблівасці харчавання. Асноўныя прадукты, якія спажывае насельніцтва, – гэта малако і малочныя прадукты, бульба, мясныя прадукты, у значна меншай колькасці гародніна і садавіна. Насельніцтва Рэспублікі Беларусь, асабліва сельскія жыхары, часта спажывае і так званыя «дары лесу» – ягады, грыбы, мяса дзікіх жывёл, рыбу і інш.

Па выніках даследаванняў, на харчовыя прадукты лесу, якія складаюць усяго некалькі адсоткаў ад масы штодзённага рацыёну сельскіх жыхароў Беларускага Палесся, даводзіцца да 50% паступлення агульнай актыўнасці цэзія-137 у іх арганізм ад агульнай колькасці ежы.

Калі ў насельніцтва на працягу года харчовы рацыён уключае чатыры асноўныя прадукты (мяса, малако, бульбу і гародніну), то сумарная доза ўнутранага апраменьвання складзе каля 0,9 мЗв, па гэтых кампанентах харчовага рацыёна неабходна паменшыць дапушчальныя ўзроўні забруджвання.

Для зніжэння доз унутранага апраменьвання і разбуральнага дзеяння радыяцыі неабходна рэгулярна ўжываць у ежу агародніну і садавіну, якія ўтрымліваюць пекцінавыя рэчывы.

Ключавыя словы: доза ўнутранага апраменьвання, радыёнукліды, радыеактыўнае забруджванне, цэзій-137.

Для цытавання: Чарнушэвіч Р. А., Дамнянкова А. У., Кісялёў С. У., Азоўская Н. А. Асаблівасці арганізацыі харчавання насельніцтва ва ўмовах павышанай радыяцыйнай рызыкі // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 201–207. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-22.

G. A. Chernushevich, A. V. Domnenkova, S. V. Kiselev, N. O. Azovskaya
Belarusian State Technological University

PROBLEMS OF FOOD SUPPLY FOR POPULATION UNDER INCREASED RADIATION RISKS

The paper analyzes factors affecting internal radiation doses of people residing in the radionuclides contaminated areas of Belarus.

Radionuclides can enter the human body with food consumed by people. The basic diet of Belarusian people includes such main foodstuffs as milk and dairy products, potatoes, meat, some fruit and vegetables. Non-timberresourcesofforest, i. e., berries, mushrooms, game meat, fish also make an integral part of people's diet.

Studies show that 'forest foodstuffs' make only insignificant proportion of everyday diet of rural residents of Belarusian Polesye. However, these foodstuffs can provide up to 50% of cesium-137 total activity in the human body.

The four main constituents of the annual human diet (beef, milk, potatoes and vegetables) will result in the total internal radiation dose of 0,9 mSv, permissible contamination levels shall be reduced for these diet constituents.

In order to reduce the internal radiation doses and eliminate radiation hazards, the human diet should include fruit and vegetables containing pectin and having radioprotective properties.

Keywords: internal dose, radionuclides, radioactive contamination, cesium-137.

For citation: Chernushevich G. A., Domnenkova A. V., Kiselev S. V., Azovskaya N. O. Problems of food supply for population under increased radiation risks. *Proceeding of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 201–207. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-22 (In Belarusian).

Уводзіны. Адною з найбуйнейшых тэхнагенных катастроф канца 20-га стагоддзя, якая аказала значны негатыўны ўплыў на вядзенне гаспадарчай дзейнасці на тэрыторыі Беларусі, стала аварыя на Чарнобыльскай АЭС (ЧАЭС) [1].

Галоўным наступствам гэтай аварыі з’явілася радыяцыйнае забруджванне значнай тэрыторыі радыенуклідамі цэзія-137, стронцыя-90 і інш. Асаблівасцю гэтых радыенуклідаў з’яўляецца тое, што пасля паступлення ў навакольнае асяроддзе, яны лёгка ўключаюцца ў біялагічныя цыклы міграцыі, што ў канчатковым выніку абумоўлівае іх лёгкае паступленне ў арганізм жывёл і чалавека і прыводзіць да дадатковага ўнутранага апраменьвання [1, 2].

Калі ў першыя месяцы, гады пасля аварыі, галоўная частка дозавай нагрузкі для паўднёвых рэгіёнаў Беларусі фарміравалася за кошт знешняга апраменьвання, то на сённяшні дзень асноўную дозавую нагрузку ад уздзеяння радыяцыі (на розных ацэнках ад 70 да 90%) жыхары забруджаных радыенуклідамі раёнаў Беларусі атрымліваюць за кошт спажывання прадуктаў харчавання, вырабленых у прыватным сектары, і «дароў лесу», якія не прайшлі прамысловую перапрацоўку [2, 3].

Небяспека ўнутранага апраменьвання, выкліканага паступленнем радыенуклідаў унутр арганізма, абумоўлена тым, што іх дзеянне працягваецца ўвесь час, пакуль радыенукліды не будуць выведзены з арганізма ў выніку абменных працэсаў або радыеактыўнага распаду [3–5].

У Рэспубліцы Беларусь тэрыторыя ляснога фонду, аднесеная да зон радыеактыўнага забруджвання, складала на 1 студзеня 2022 г. 1513,14 тыс. га, або 15,62% ад агульнай плошчы. Асноўная доля забруджаных радыенуклідамі лясоў знаходзіцца ў падпарадкаванні Міністэрства лясной гаспадаркі (Мінлясгаса) Рэспублікі Беларусь (81,7%) і Дэпартаменту па ліквідацыі наступстваў катастрофы на ЧАЭС Міністэрства па надзвычайных сітуацыях (14,3%). Згодна з прагнозам на 2026 г. (праз 40 гадоў пасля аварыі на ЧАЭС), плошча ляснога фонду Мінлясгаса ў зонах радыеактыўнага забруджвання паменшыцца да 1123,0 тыс. га, з асноўнай доляй (92%) забруджаных лясоў у Гомельскім і Магілёўскім ДВЛГА [6, 7].

Такім чынам, у зоне радыеактыўнага забруджвання застанецца значная тэрыторыя. У сувязі

з гэтым найважнейшым фактарам для насельніцтва, якое пражывае на забруджаных радыенуклідамі тэрыторыях, з’яўляецца выкананне асаблівых нормаў паводзін, харчавання, каб звесці радыяцыйны наступствы да мінімуму і павялічыць рэзерв арганізма ў адносінах да разбуральных уздзеянняў радыяцыі [3, 5, 8–12].

Асноўная частка. Небяспека радыенуклідаў, якія трапілі ў навакольнае асяроддзе, вызначаецца тым, што ў выніку радыеактыўных распадаў іх ядраў вылучаецца высокаэнергетычнае выпраменьванне ў выглядзе патокаў часціц або квантаў. Такое выпраменьванне называюць іанізуючым [4].

Уздзеянне іанізуючага выпраменьвання на арганізм уяўляе сабой многастадыйны працэс, які ўключае ў сябе фізічную, хімічную і біялагічную стадыі. Першасным працэсам уздзеяння іанізуючага выпраменьвання з’яўляюцца іанізацыя і ўзбуджэнне атамаў і малекул у тканках і арганізме ў цэлым. Далей, у выніку хімічных рэакцый, якія назіраюцца ў клетках пад уплывам іонаў, адбываюцца змяненні ў малекулах бялкоў, ліпідным пласце мембран, ДНК і іншых элементах клетак, што прыводзіць да парушэння біяхімічных працэсаў у арганізме і магчымага развіцця прамянёвай хваробы. Такое ўздзеянне на арганізм можа мець зваротны і незваротны характар [4].

У залежнасці ад колькасці іанізуючага выпраменьвання, дзеючага на арганізм чалавека (дозы выпраменьвання), вылучаюць два віды эфектаў: *дэтэрмінаваныя*, пры якіх цяжкасць наступстваў апраменьвання вызначаецца велічынёй дозы (прамянёвая хвароба, прамянёвы апёк, бясплоддзе і інш.) і *стахастычныя* (найбольш верагодныя) эфекты, пры якіх доза вызначае не цяжкасць, а верагоднасць наступлення таго ці іншага захворвання (злаякасныя пухліны, лейкозы і інш.). Умоўнай мяжой паміж гэтымі эфектамі з’яўляецца доза выпраменьвання, роўная прыкладна 1 Грэю [4].

Гранічна дапушчальныя дозы апраменьвання насельніцтва рэгламентуюць крытэрыі ацэнкі радыяцыйнага ўздзеяння: гігіенічны нарматыў (ГН ад 28.12.2012 № 213) [13]. Гэты нарматыўны дакумент устанаўлівае, што для насельніцтва, з улікам асоб з персаналу, па-за

сферай і ўмоў іх вытворчай дзейнасці, мяжа дозы агульнага апраменьвання 1 мЗв/год у сярэднім за любыя паслядоўныя 5 гадоў, але не больш за 5 мЗв/год.

Асноўным дозаўтваральным элементам з'яўляецца цэзій-137. Цэзій добра раствараецца ў вадзе і хутка распаўсюджваецца ў навакольным асяроддзі. Пры наяўнасці цэзія-137 у глебе ён усмоктваецца раслінамі і па харчовым ланцугам трапляе ў арганізм чалавека [2, 14].

Такім чынам, асноўным шляхам пранікнення цэзія-137 у арганізм чалавека з'яўляецца харчовы шлях, менш істотным – інгаляцыйны шлях, напрыклад у выпадку ўзняцця пылу забруджаннага грунту альбо ў выніку лясных пажараў на забруджанай радыенуклідамі тэрыторыі.

У цяперашні час значны ўклад у дозу ўнутранага апраменьвання насельніцтва ўносяць лясныя харчовыя прадукты, галоўным чынам, грыбы і ягады, якія з'яўляюцца прадуктам спажывання сельскіх жыхароў, пражываючых на забруджаных радыенуклідамі тэрыторыях [5, 9].

Спажыванне лясных ягад на аднаго жыхара Беларусі складае ў сярэднім 3–10 кг у год, што прыводзіць да павелічэння дозы ўнутранага апраменьвання на 0,3–0,6 мЗв/год пры шчыльнасці забруджвання 185 кБк/м² [5, 11].

На паступленне радыенуклідаў у арганізм чалавека аказваюць уплыў і асаблівасці харчавання насельніцтва. Да асноўных прадуктаў, якія ўжывае насельніцтва Беларусі, адносяцца малако і малочныя прадукты, бульба, мясныя прадукты, а таксама невялікая колькасць гародніны і садавіны. У рацыёне сельскіх жыхароў шырока выкарыстоўваюцца лясныя прадукты, так званыя «дары лесу», – ягады, грыбы, мяса дзікіх жывёл, рыба і інш.

Пасля аварыі на ЧАЭС жыхары забруджаных тэрыторый Беларусі пастаянна спажываюць харчовыя прадукты, якія ўтрымліваюць доўгажывучыя радыенукліды, што прыводзіць

да хранічнага ўздзеяння малых доз радыяцыі на арганізм чалавека.

Пры пастаянным спажыванні забруджаных цэзіем-137 прадуктаў харчавання разлік індывідуальнай дозы ўнутранага апраменьвання ажыццяўляецца па формуле

$$H_{\text{унутр}} = k \sum_i m_i \cdot A_{m_i},$$

дзе k – пераліковы каэфіцыент, які роўны $1,3 \cdot 10^{-8}$ Зв/Бк; m_i – гадавое спажыванне i -га прадукту харчавання, кг; A_{m_i} – удзельная актыўнасць i -га прадукту, Бк/кг [4].

Для абмежавання ўнутранага апраменьвання насельніцтва ў Беларусі ўстаноўлены Рэспубліканскія дапушчальныя ўзроўні (РДУ-99) – нарматывы гранічна дапушчальнага ўтрымання радыенуклідаў цэзію-137 і стронцыю-90 у прадуктах харчавання [15, 16].

Сярэднія данныя аб гадавым спажыванні асноўных прадуктаў харчавання жыхарамі рэспублікі за 2020–2021 гг., вынікі разлікаў іх актыўнасці па колькасці цэзію-137, якія адпавядаюць прадуктам РДУ-99, і магчымая гадавая доза ўнутранага апраменьвання пры гэтым рацыёне прыведзены ў табл. 1.

З табл. 1 бачна, што пры дадзеным харчовым рацыёне сумарная доза ўнутранага апраменьвання складае каля 1 мЗв. А сумарная гадавая доза ўнутранага апраменьвання набывае значэнне 0,86 мЗв/г пры укладзе чатырох асноўных прадуктаў (мяса, малака, бульбы і гародніны). Такім чынам, па гэтых кампанентах харчовага рацыёну варта паменшыць дапушчальныя ўзроўні забруджвання.

Вынікі разлікаў магчымых доз апраменьвання пры спажыванні насельніцтвам 10 кг лясных ягад у год, нарыхтаваных на забруджаных радыенуклідамі тэрыторыях, прадстаўлены ў табл. 2.

Табліца 1

Спажыванне асноўных прадуктаў харчавання на душу насельніцтва ў год, кг

Прадукт	Гадавое спажыванне, кг, л	РДУ-99, Бк/кг	Гадавое паступленне, Бк/год	Гадавая доза, мЗв / год
Мяса, мясапрадукты	99	180	24 750	0,322
Малочныя прадукты	247	50	12 350	0,160
Яйкі	(268 шт.) 13,7	50	685	0,009
Рыба	12,5	180	2250	0,030
Цукар	38,5	60	2310	0,030
Алей	17,2	40	688	0,009
Бульба	174	80	13 920	0,180
Гародніна	152	100	15 200	0,198
Садавіна	98	40	3920	0,050
Хлеб, крупы	92	40	3680	0,047
Вада	365	10	3650	0,047
Разам (рацыён)	–	–	83 403	1,084

З данных, прыведзеных у табл. 2, бачна, што доза ўнутранага апраменьвання насельніцтва за кошт спажывання ягад можа складаць 2 МЗв/год і больш.

Табліца 2

Вынікі разлікаў магчымых доз апраменьвання за кошт спажывання ягад

Павярховае забруджанне ^{137}Cs , Кь/км ² (кБк/м ²)	Доза за кошт спажывання ягад, мЗв/год
1–5 (37–185)	0,05–0,25
5–15 (185–555)	0,25–0,75
15–45 (555–1480)	0,75–2
>40 (>1480)	>2

У адпаведнасці з гігіенічным нарматывам (ГН ад 28.12.2012 № 213), індывідуальная гранічна дапушчальная доза ад тэхнагенных крыніц, якую чалавек можа атрымаць за ўвесь перыяд жыцця, складае 70 мЗв, або 1 мЗв/год. Ужыванне адных толькі лясных ягад, нарыхтаваных на забруджаных радыенуклідамі тэрыторыях, можа правесці да перавышэння індывідуальнай гранічна дапушчальнай дозы ў 1 мЗв/год [13].

Любая дадатковая доза радыяцыі звыш прыроднага радыяцыйнага фону з'яўляецца небяспечнай для чалавека і патрабуе абавязковага прыняцця мер па яе зніжэнні.

Паступленне радыенуклідаў у арганізм чалавека можа адбывацца як напрамую, напрыклад пры непасрэдным ужыванні харчовых прадуктаў, сабраных на забруджаных тэрыторыях, так і па харчовых ланцугах праз першасных і другасных спажыўцоў [2].

Значнаму зніжэнню канцэнтрацыі радыенуклідаў у прадуктах харчавання садзейнічае тэхналагічная і кулінарная іх апрацоўка. Зніжэнне ўтрымання цэзію-137 у прадуктах заснавана на тым, што цэзій раствараецца ў вадзе.

Разгледзім ніжэй спосабы памяншэння канцэнтрацыі радыенуклідаў у асноўных прадуктах сельскагаспадарчай вытворчасці [2]:

– пры падрыхтоўцы бульбы, караняплодаў, гародніны і садавіны, збожжа прымяняюцца прыёмы першаснай ачысткі, выдаленне частак прадукту, у якіх назапашваецца больш за ўсё радыенуклідаў. Мехаанічная ачыстка дазваляе зменшыць да 50% радыенуклідаў, якія знаходзяцца на паверхні і ў вонкавых пластах прадукту. Засолка гародніны і садавіны памяншае колькасць цэзія-137 на 30–40%, так як апошні пераходзіць у расол, які спажываць нельга;

– перад кулінарнай апрацоўкай мясных прадуктаў неабходна старанна прамыць іх пад

праточнай вадой. Рэкамендуецца вымочваць мяса на працягу 2 гадз у падсоленай халоднай вадзе, лепш праточнай, і зліваць адвар пасля 10-хвіліннага кіпячэння. Гэта дазваляе паменшыць канцэнтрацыю радыенуклідаў у гатовых прадуктах на 50–80%;

– для атрымання чыстай малочнай прадукцыі неабходна праводзіць радыеметрычны кантроль кармоў. Малако можна перапрацоўваць на сыр і інш. У працэсе сепарацыі малака да 90% усіх радыенуклідаў застаецца ў сыроватцы.

Варта адзначыць, што нават пры паступленні радыеактыўнага цэзію ў арганізм чалавека, ён не застаецца там назаўжды. Ачышчэнне арганізма чалавека ад радыенуклідаў ідзе праз ныркі, печань, страўнік. Без прымянення спецыяльных сродкаў біялагічны перыяд паўвыведзення з арганізма цэзію-137 у дарослага чалавека складае 90–150 дзён, у дзяцей – 15–75 дзён у залежнасці ад узросту. Гэта значыць, што нават пражываючы на забруджаных радыенуклідамі тэрыторыях, але спажываючы чыстыя (без радыенуклідаў) прадукты харчавання, можна пазбегнуць дадатковай дозавай нагрузкі на арганізм. Значна стымулюе вывад цэзію-137 з арганізма спажыванне прадуктаў, багатых каліем [2–4].

Для памяншэння ўнутранага апраменьвання магчыма правядзенне паскоранага выяўлення радыенуклідаў з арганізма. Гэта дасягаецца прымяненнем спецыяльных прэпаратаў-энтэра-сарбентаў. Здольнасцю звязваць і паскорана выводзіць з арганізма радыенукліды валодаюць некаторыя харчовыя прадукты, у прыватнасці пекцін. У Рэспубліцы Беларусь выпускаюць пекцінавыя харчовыя дабаўкі «Вітапект» і «Вітапект-2». Прынцып дзеяння пекцінавых прэпаратаў, якія дазваляюць паскорана выводзіць радыенукліды, заснаваны на тым, што пекцін здольны эфектыўна звязваць і выводзіць з арганізма радыенукліды і іншыя шкодныя для чалавека рэчывы. Пекцінавыя рэчывы ўяўляюць сабой прыродныя арганічныя злучэнні-поліцукрыды і ўтрымліваюцца ў розных колькасцях у гародніне і садавіне. Ачышчэнне арганізма ідзе больш паспяхова, калі рэгулярна піць натуральныя сокі, ужываць гародніну і садавіну, якія змяшчаюць пекціны [2, 4, 5, 12].

Больш за ўсё пекціну змяшчаецца ў цытрусавых: лімонах, апельсінах, мандарынах. З мясцовых прадуктаў шмат пекціну змяшчаецца ў яблыках, слівах, грушах, журавінах, рабіне, моркве і сталовых бураках, таму іх важна ўжываць круглы год.

Арганізм чалавека можа паменшыць паступленне радыенуклідаў, стварыўшы рэзервы жыццёва важных для яго рэчываў. У табл. 3 прыведзены стабільныя элементы, якія блакуюць паглыннанне арганізмам радыенуклідаў [2, 10].

Табліца 3
Выбарчае паглынне радыенуклідаў

Стабільны элемент	Радыенуклід
Кальцый	Стронцый-90
Ёд	Ёд-131
Жалеза	Плутоній-238,-239
Калій	Цэзій-137
Цынк	Цынк-65

Пералічаныя вышэй блакавальныя элементы знаходзяцца ў той ці іншай канцэнтрацыі ў звычайных прадуктах харчавання. Такім чынам, выключэнне дэфіцыту асноўных элементаў у арганізме чалавека блакуе паглынне радыеактыўных рэчываў.

У сучасных умовах ежа павінна акрамя асноўных функцый – задавальнення фізіялагічных патрэбаў у харчовых рэчывах і энергіі спрыяць адаптацыі арганізма да неспрыяльных умоў навакольнага асяроддзя і выконваць лячэбна-прафілактычныя задачы, таму харчаванне ставіцца да тых найважнейшых фактараў, якія на працягу ўсяго жыцця ўздзейнічаюць на здароўе чалавека.

Медыцынскія даследаванні па ацэнцы фактычнага харчавання розных груп насельніцтва Беларусі праявілі шэраг негатыўных тэндэнцый, якія праяўляюцца ў зніжэнні спажывання свежай гародніны, садавіны і морапрадуктаў, павелічэнні спажывання хлебабулачных і макаронных вырабаў, тлушчаў жывёльнага паходжання, разнастайных рафінаваных прадуктаў харчавання. Варта таксама адзначыць, што тэхналагічная апрацоўка прадуктаў харчавання значна зніжае ўтрыманне біялагічна актыўных кампанентаў.

У арганізацыі харчавання насельніцтва ва ўмовах радыеактыўнага забруджвання тэрыто-

рыі неабходна ўлічваць шэраг іншых неспрыяльных фактараў навакольнага асяроддзя, ладу жыцця і інш., уздзеянне якіх на чалавека можа мець і больш значныя наступствы.

Заклучэнне. Тэрыторыя Беларусі, забруджаная радыенуклідамі, складае каля 16% ад агульнай плошчы [6, 7]. Праблема харчавання на забруджаных радыенуклідамі тэрыторыях будзе захоўвацца яшчэ працяглы час, арганізацыя харчавання насельніцтва ў гэтых умовах захоўвае сваю актуальнасць. Вынікі кантролю змянення радыяцыйнага становішча і радыяцыйнага кантролю прадукцыі павінны быць выкарыстаны для інфармавання жыхароў населеных пунктаў, размешчаных на тэрыторыях, забруджаных радыенуклідамі [6].

Пры наведванні мясоў неабходна звяртаць увагу на інфармацыйныя знакі, якія размешчаны на тэрыторыях радыеактыўнага забруджвання. Збор грыбоў і ягад дазволены, з абавязковым радыеметрычным кантролем, у мясах са шчыльнасцю забруджвання да 2 Кб/км² [17]. Праверыць «дары лесу» (і іншыя прадукты харчавання) на ўтрыманне радыенуклідаў можна ў пунктах радыяцыйнага кантролю мясцовых мясгасаў або ў радыелагічных лабараторыях цэнтраў гігіены і эпідэміялогіі, у ветэрынарных лабараторыях рынкаў. У мясгасах і мясніцтвах устаноўлены спецыяльныя стэнды, якія змяшчаюць інфармацыю аб радыеактыўным забруджванні мясной прадукцыі, дзеючых нарматываў утрымання ў ёй радыенуклідаў, картасхемы радыеактыўнага забруджвання мясоў [17, 18].

Збалансаванае харчаванне вырашае шмат актуальных задач: задавальняе патрэбы арганізма чалавека ў розных рэчывах і вітамінах, выконвае ахоўную, адаптыўную функцыі, павышае ўстойлівасць арганізма да радыеактыўнага фактару.

Спісак літаратуры

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: Рецикая укрупнен. тип., 1999. 454 с.
2. Савенко В. С. Радиоэкология. Минск: Дизайн ПРО, 1997. 208 с.
3. Байрашевская Д. А. Формирование дозы внутреннего облучения населения, употребляющего продукты загрязненных лесных экосистем. Минск: МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2005. 330 с.
4. Чернушевич Г. А., Перетрухин В. В. Радиационная безопасность. Лабораторный практикум. Минск: БГТУ, 2018. 198 с.
5. Перетрухин В. В., Чернушевич Г. А. Оптимизация питания населения, проживающего в условиях повышенного экологического риска // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2009. Вып. XVII. С. 268–273.
6. Радиационный контроль // Гос. учреждение по обороне и мониторингу леса «Беллесозащита». URL: <https://bellesozaschita.by/radiacionnyj-kontrol> (дата обращения: 07.01.2022).
7. Карбанович Л. Н. Площадь радиационного загрязнения лесов уменьшилась // Белорус. лесная газ. 2022. 6 янв. С. 2.
8. Карбанович А. В., Сермакшева Е. В., Домненкова А. В. Контроль индивидуальных доз внешнего облучения работников лесного хозяйства // Лесное и охотничье хозяйство. 2014. № 2. С. 19–23.

9. Домненкова А. В., Домненков В. А. Радиационный контроль продукции побочного пользования // *Технология органических веществ: тез. докл. 79-й науч.-техн. конф.*, Минск, 2–6 февр. 2015 г. Минск, 2015. С. 38.
10. Домненкова А. В. Организация рационального питания в условиях радиационного фактора // *Технология органических веществ: тез. докл. 80-й науч.-техн. конф.*, Минск, 1–12 февр. 2016 г. Минск, 2016. С. 3.
11. Азовская Н. О., Перетрухин В. В., Чернушевич Г. А. Исследование степени радиоактивного загрязнения пищевой продукции леса и ее вклад в дозовую нагрузку населения // *Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов*. 2018. № 2 (210). С. 251–257.
12. Босак В. Н., Сачивко Т. В. Обеспечение продовольственной безопасности регионов, пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС // *Развитие агропромышленного производства и сельских территорий: сб. Междунар. науч.-практ. конф.*, Новосибирск, 2 марта 2016 г. Новосибирск, 2016. С. 70–74.
13. Критерии оценки радиационного воздействия: ГН 28.12.2012. № 213. Минск: М-во здравоохранения Респ. Беларусь, 2012. 136 с.
14. Домненкова А. В., Карбанович Л. Н. Особенности миграции цезия-137 по компонентам лесного биогеоценоза // *Сахаровские чтения 2016 года: экологические проблемы XXI века: материалы 16-й Междунар. науч. конф.*, Минск, 19–20 мая 2016 г. Минск, 2016. С. 211.
15. 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.
16. Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде: ГН 02.05.2001 № 8/5786. Минск: М-во здравоохранения Респ. Беларусь, 1999. 10 с.
17. Правила ведения лесного хозяйства на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС. Минск, 2016. 16 с.
18. 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.

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. Savenko V. S. *Radioekologiya* [Radioecology]. Minsk, Dizayn PRO Publ., 1997. 208 p. (In Russian).
3. Bajrashevskaya D. A. *Formirovaniye dosy vnutrennego oblucheniya naseleniya, upotreblyayushchego produkty zagryasnennykh lesnykh ekosistem* [Formation of internal exposure doses of the population consuming food products of contaminated forest ecosystems]. Minsk, MGEU Publ., 2005. 330 p. (In Russian).
4. Chernushevich G. A., Peretrukhin V. V. *Radiatsionnaya bezopasnost'. Laboratornyy praktikum: [Radiation safety. Laboratory workshop]*. Minsk, BSTU Publ., 2018. 198 p. (In Russian).
5. Peretrukhin V. V., Chernushevich G. A. Optimization of nutrition of the population living in conditions of increased environmental risk. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forest and Woodworking Industry, 2009, issue XVII, pp. 268–273 (In Russian).
6. Radiation control. URL: <https://bellesozaschita.by/radiacionnyj-kontrol> (accessed 01.07.2022) (In Russian).
7. 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).
8. Karbanovich L. N., Semaksheva E. V., Domnenkova A. V. Control of the constant dose of exposure of forest workers. *Lesnoye i okhotnich'ye khozyaystvo* [Forestry and hunting], 2014, no. 2, pp. 19–23 (In Russian).
9. Domnenkova A. V., Domnenkov V. A. Radiation control of side-use products. *Tekhnologiya organicheskikh veshchestv: tezisy 79-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Technology of organic substances: abstracts of the 79th scientific and technical conference]. Minsk, 2015, p. 38 (In Russian).
10. Domnenkova A. V. Organization of rational nutrition under the conditions of the radiation factor. *Tekhnologiya organicheskikh veshchestv: tezisy 80-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Technology of organic substances: abstracts of the 80th scientific and technical conference]. Minsk, 2016, p. 3 (In Russian).
11. Azovskaya N. O., Peretrukhin V. V., Chernushevich G. A. Investigation of the degree of radioactive contamination of food products of the forest and its contribution to the dose load of the population. *Trudy BGTU*. [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry, Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2018, no. 2 (210), pp. 251–257 (In Russian).

12. Bosak V. N., Sachivko T. V. Ensuring food security of the regions affected by the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Razvitiye agropromyshlennogo proizvodstva i sel'skikh territoriy: sbornik Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Development of agro-industrial production and rural areas], Novosibirsk, 2016, pp. 70–74 (In Russian).

13. 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).

14. Domnenkova A. V., Karbanovich L. N. Peculiarities of cesium-137 migration along the components of forest biogeocenosis. *Sakharovskiye chteniya 2016 goda: ekologicheskiye problemy XXI veka: materialy 16-y Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Sakharov Readings 2016: environmental problems of the XXI century: materials of the 16th International Scientific Conference]. Minsk, 2016, p. 211 (In Russian).

15. 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).

16. GN 02.05.2001. Republican permissible limits of cesium-137 and strontium-90 radionuclides content in food and drinking water. No. 8/5786. Minsk, Ministry of Health of the Republic of Belarus Publ., 2001. 10 p. (In Russian).

17. *Pravila vedeniya lesnogo khozyaystva na territoriyakh, podvergshikhsya 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).

18. 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).

Інфармацыя аб аўтарax

Чарнушэвіч Рыгор Аляксеевіч – старшы выкладчык кафедры бяспекі жыццядзейнасці. Беларускі дзяржаўны тэхналагічны ўніверсітэт (220006, г. Мінск, вул. Святлова, 13а, Рэспубліка Беларусь). E-mail : gregory1946@belstu.by

Дамнянкова Алеся Уладзіміраўна – кандыдат сельскагаспадарчых навук, дацэнт кафедры бяспекі жыццядзейнасці. Беларускі дзяржаўны тэхналагічны ўніверсітэт (220006, г. Мінск, вул. Святлова, 13а, Рэспубліка Беларусь). E-mail : adomnenkova@gmail.com

Кісялёў Сяргей Уладзіміравіч – кандыдат тэхнічных навук, старшы выкладчык кафедры бяспекі жыццядзейнасці. Беларускі дзяржаўны тэхналагічны ўніверсітэт (220006, г. Мінск, вул. Святлова, 13а, Рэспубліка Беларусь). E-mail : kiselev@belstu.by

Азоўская Наталля Алегаўна – кандыдат сельскагаспадарчых навук, старшы выкладчык кафедры бяспекі жыццядзейнасці. Беларускі дзяржаўны тэхналагічны ўніверсітэт (220006, г. Мінск, вул. Святлова, 13а, Рэспубліка Беларусь). E-mail : azovskaya_natasha@tut.by

Information about the authors

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

Domnenkova Alesya 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

Kiselev Sergey Vladimirovich – PhD (Agriculture), Senior Lecturer, the Department of Occupational Safety. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kiselev@belstu.by

Azovskaya Natalya Olegovna – PhD (Agriculture), Senior Lecturer, the Department of Occupational Safety. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: azovskaya_natasha@tut.by

Паступіў 15.10.2022

УДК 621.914:674:004

В. Н. Гаранин, В. В. Раповец, Т. А. Машорипова, Г. В. Алифировец
Белорусский государственный технологический университет

ВИБРАЦИОННОЕ РЕЗАНИЕ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СТАНКАХ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Данная статья посвящена теоретическим исследованиям в области вибрационного разрушения материалов с целью поиска возможностей повышения износостойкости дереворежущих фрезерных инструментов. При обработке древесины и древесных материалов на высоких скоростях использование вибрационного резания позволяет изменять условия взаимодействия системы «инструмент обрабатываемый материал», что открывает новые возможности для применения различных упрочняющих технологий инструмента, основанных исключительно на создании износостойких покрытий.

Использование вибрационного резания в процессе обработки древесины на деревообрабатывающем оборудовании с ЧПУ позволяет влиять на динамику процесса резания древесины и положительно сказывается на возможности использования инструментальных материалов с низкой ударной вязкостью при изготовлении дереворежущих инструментов.

Проведенные теоретические исследования показали, что вибрации, обусловленные процессом резания с оптимальными частотой и амплитудой колебаний, позволяют улучшать качественные показатели процесса механической обработки фрезерованием за счет адаптации к условиям создания разрушающих напряжений в зоне резания. Это дает возможность снизить энергоемкость процесса обработки и увеличить технологическую стойкость режущего инструмента с применением различных упрочняющих технологий.

Ключевые слова: вибрационное резание, параметры, древесные материалы, резание, исследование.

Для цитирования: Гаранин В. Н., Раповец В. В., Машорипова Т. А., Алифировец Г. В. Вибрационное резание древесных материалов на станках с числовым программным управлением // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 208–214. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-23.

V. N. Garanin, V. V. Rapovets, T. A. Mashoripova, G. V. Alifirovets
Belarusian State Technological University

VIBRATION CUTTING OF WOOD MATERIALS ON MACHINES WITH NUMERICAL CONTROL

This article is devoted to theoretical research in the field of vibrational destruction of materials in order to find ways to increase the wear resistance of wood-cutting milling tools. When processing wood and wood-based materials at high speeds, the use of vibration cutting makes it possible to change the conditions for the interaction of the "tool-work material" system, which opens up new opportunities for the use of various hardening tool technologies based solely on the creation of wear-resistant coatings.

The use of vibration cutting in the process of wood processing on CNC woodworking equipment allows you to influence the dynamics of the wood cutting process and has a positive effect on the possibility of using tool materials with low impact strength in the manufacture of wood cutting tools.

The theoretical studies carried out have shown that vibrations caused by the cutting process with the optimal frequency and amplitude of oscillations make it possible to improve the quality indicators of the process of mechanical processing by milling by adapting to the conditions for creating destructive stresses in the cutting zone. This will reduce the energy intensity of the processing process and increase the technological durability of the cutting tool, using various hardening technologies.

Key words: vibration cutting, parameters, wood materials, cutting, research.

For citation: Garanin V. N., Rapovets V. V., Mashoripova T. A., Alifirovets G. V. Vibration cutting of wood materials on machines with numerical control. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 208–214. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-23 (In Russian).

Введение. На сегодняшний день повышение износостойкости дереворежущего инструмента является актуальной задачей, поскольку увеличение объемов выпускаемой продукции

из древесины ведет к увеличению объемов используемого инструмента. С точки зрения экономики разработка технологии повышения износостойкости дереворежущего инструмента

является актуальной целью, позволяющей деревообработчикам извлечь дополнительную прибыль.

Использование вибрационного взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом при высокоскоростном резании древесины позволяет изменить условия взаимодействия «инструмент – деталь», что открывает новые возможности к использованию упрочняющих технологий, базирующихся не только на использовании покрытий или обработке режущих материалов.

Использование вибраций инструмента при измельчении древесины в стружку на деревообрабатывающем оборудовании позволяет влиять на динамику процесса резания древесины, что положительно сказывается на результатах использования инструментальных материалов с низкой ударной вязкостью для изготовления дереворежущего инструмента.

Основная часть. Цель исследования – установление возможностей реализации вибрационного резания древесных материалов на станках с числовым программным управлением.

Исследователи, которые ранее изучали способы деления древесины, обратили внимание на перспективность вибрационного резания при обработке древесных материалов. Так, в работе [1] В. И. Любченко рассматривал открытое прямолинейное резание, при котором главное движение лезвия относительно неподвижной заготовки складывается из двух движений: поступательного с постоянной скоростью V_1 и возвратно-поступательного (колебательного) с переменной скоростью V_2 , изменяющейся по синусоидальному закону.

Если амплитуда колебательного движения лезвия мала (доли миллиметра, несколько миллиметров или сантиметров), а угловая скорость или число двойных ходов лезвия (циклов) в минуту достаточно велико (несколько сот или тысяч ходов в минуту), то такое резание предлагают называть вибрационным, в данном случае – с продольными вибрациями. При этом угол скола равен нулю, а толщина срезаемого слоя – величина постоянная.

При таком резании наблюдались условия, когда происходила повторная зачистка лезвием поверхности резания, что положительно сказывалось на качестве обработанной поверхности. Как видно, аналогично использованию рефлекторного фрезерования дополнительные степени свободы инструмента при обработке древесины позволяют добиться улучшения качества обработанных поверхностей без увеличения скоростей деталей привода или увеличения количества режущих элементов.

Вибрационное резание древесины имеет и другое преимущество. Когда на обрабатываемый материал воздействует со стороны лезвия знакопеременная нагрузка, в материале появляется пульсирующее знакопеременное поле напряжений. Оно локализуется в некоторой массе материала, обладающей определенной собственной частотой упругих колебаний. В. И. Любченко предлагает подобрать такую амплитуду и частоту накладываемых на лезвие вибраций, при которых возникает резонанс между этими вибрациями и колебаниями материала. В этом случае материал разрушается при меньших напряжениях, чем в случае приложения постоянной нагрузки, обеспечив тем самым снижение энергопотребления процесса резания.

Изыскание новых методов обработки древесины и древесных материалов резанием ведется путем:

а) изменения характера приложения механического воздействия на срезаемый слой (например, вибрационное, сверхскоростное взаимодействие);

б) использования качественно новых видов воздействия на материал срезаемого слоя (химического, электрического);

в) применения комбинированных методов обработки, построенных на совмещении монотонного механического воздействия с вибрационным, тепловым и другими видами энергии.

Сочетание каждого из этих процессов с другими, а также комбинации из трех или четырех элементов определяют известные к настоящему времени новые методы обработки материалов со снятием стружки. Комбинированные методы обработки отличаются наибольшей эффективностью. Значительное место среди них занимает механическая обработка с вибрациями в специальных средах, совмещающая равномерное движение резания с вибрационным воздействием на материал срезаемого слоя.

Применение резания с вибрациями (на оптимальных режимах) позволяет успешно решать многие актуальные проблемы, стоящие перед металлообрабатывающей промышленностью. В частности, резание с вибрациями обеспечивает надежное дробление стружки. Этот факт дает возможность предполагать об успешном решении многих проблем и в деревообработке.

Большинство исследований вибраций при резании изотропных материалов выполнено на основе упрощенных структурных схем. Чаще изучение «вредных» вибраций проводят на основе исследования влияния отдельных первичных параметров на интенсивность вибраций и результаты обработки. Так, А. И. Кашириным выполнены исследования интенсивности «вредных» вибраций с учетом влияния особенностей

процесса трения только на контактных поверхностях [2], Л. П. Соколовским – с учетом особенностей пластического деформирования при врезании и выходе инструмента, И. С. Штейнбергом – с учетом процесса наростообразования на кромках лезвия инструмента.

Надо отметить, что совершенно недостаточно изучен механизм влияния «вредных» вибраций, обусловленных процессом резания, на вторичные факторы и, прежде всего, на технологическую стойкость и прочность инструмента. Исследования «полезных» вибраций, задаваемых специальными вибраторами, проведены, как правило, на основе рассмотрения прямой взаимосвязи первичных и вторичных факторов, без изучения физических закономерностей процесса резания, определяющих эту взаимосвязь.

В паре «инструмент – разрезаемый материал» следует обратить внимание на третье составляющее – полевое воздействие.

Влияние импульсного воздействия на металл было определено в лабораторных условиях [2–4].

Так, для исследования влияния вибрации на процесс резки арматурной стали профессором Волковым С. А. был использован вибратор направленного действия с частотой, равной примерно 25 Гц ($P = 1 \text{ кВт}$, $n = 1540 \text{ мин}^{-1}$). Он провел 230 экспериментов, показав, что в режиме резонанса наблюдается существенное снижение сил резания (более чем в 4 раза была уменьшена сила резания).

Изучение зоны среза материала показало, что при вибрационном резании повышается качество среза. Торцев срез более ровный и в большой степени перпендикулярен к оси стержня по сравнению с торцом при резке без вибрации. При изучении микрошлифов установлено, что при воздействии вибрации уменьшается объем деформированного металла. Этим частично и объясняется снижение энергоемкости при вибрационном резании. При действии вибрации наблюдалось изменение механических свойств и реологического поведения разрезаемого металла за счет виброактивации. Традиционное объяснение снижения «статической» составляющей силы резания заключается в том, что добавляется динамическая составляющая, дающая в сумме разрушающее воздействие. Экспериментально это не подтвердилось, но, вероятно, данное суммирование имеет место на микроуровне – на дефектах строения древесного материала.

С целью расширения частотного диапазона вибраций С. А. Волковым [2] были выполнены эксперименты по выявлению влияния ультразвукового воздействия на зону резания металлов. Удалось снизить силу резания в 1,8–2,2 раза на частоте 7,9 кГц. Для этого исследования был применен оптимальный метод статистического планирования эксперимента.

Эффект снижения прочности материала наблюдался в экспериментах, проведенных в начале 60-х годов 20 века в СССР при снятии внутренних напряжений со сварных конструкций и с затвердевшего бетона с помощью ультразвукового воздействия, а также в экспериментах со стальными шариками и плитой. Если прочность шарика была выше прочности плиты, то под воздействием ультразвука шарик деформировался (при большей прочности) только от собственного веса.

Этот же эффект наблюдался болгарским профессором Г. С. Ангеловым [5] при растяжении монокристаллов металлов цинка и алюминия.

Объяснение роли цикличности нагружения в разрушении материалов дают Ю. А. Никонов и В. А. Степанов [6]. Они считают, что одной из причин понижения напряжения разрушения при циклической нагрузке является взаимодействие поля микронапряжений от внешней нагрузки цикла с остаточными микронапряжениями, возникающими в теле после предыдущих циклов. Остаточные микронапряжения и микродефекты возникают при растяжении, а при сжатии происходит «отдых». Если сразу после растяжения в каждом цикле проводить мероприятия по снятию остаточных напряжений, то долговечность тела могла бы быть значительно повышена.

Существенный вклад в изменение прочностных свойств и реологического поведения твердых тел при воздействии динамических нагрузок вносят поверхности как наружные, так и внутренние, например, границы между волокнами и древесными частицами, выступающие в роли акустических границ и способствующие возникновению сложного спектра акустических, ультразвуковых и гиперзвуковых волн [2, 4]. При обработке древесины и древесных материалов в роли акустических границ смогут выступать как границы между волокнами и частицами самой древесины (при обработке плитных материалов), так и сами дефекты обрабатываемого материала (сучки, трещины и т. д.).

Таким образом, использование вибрационных механизмов адаптации инструмента к условиям резания материалов позволяет снизить ударные нагрузки взаимодействия. Существует возможность использовать различные вибрации и положительно влиять на процесс резания материалов путем адаптации их к условиям создания разрушающих напряжений в зоне взаимодействия. По причине того, что цилиндрическое фрезерование характеризуется циклоидальным характером образования поверхностей резания, создание «полезных» вибраций следует рассматривать с точки зрения формирования циклоиды. Этим и следует руководствоваться при разработке вибрационного фрезерного дерево-режущего инструмента.

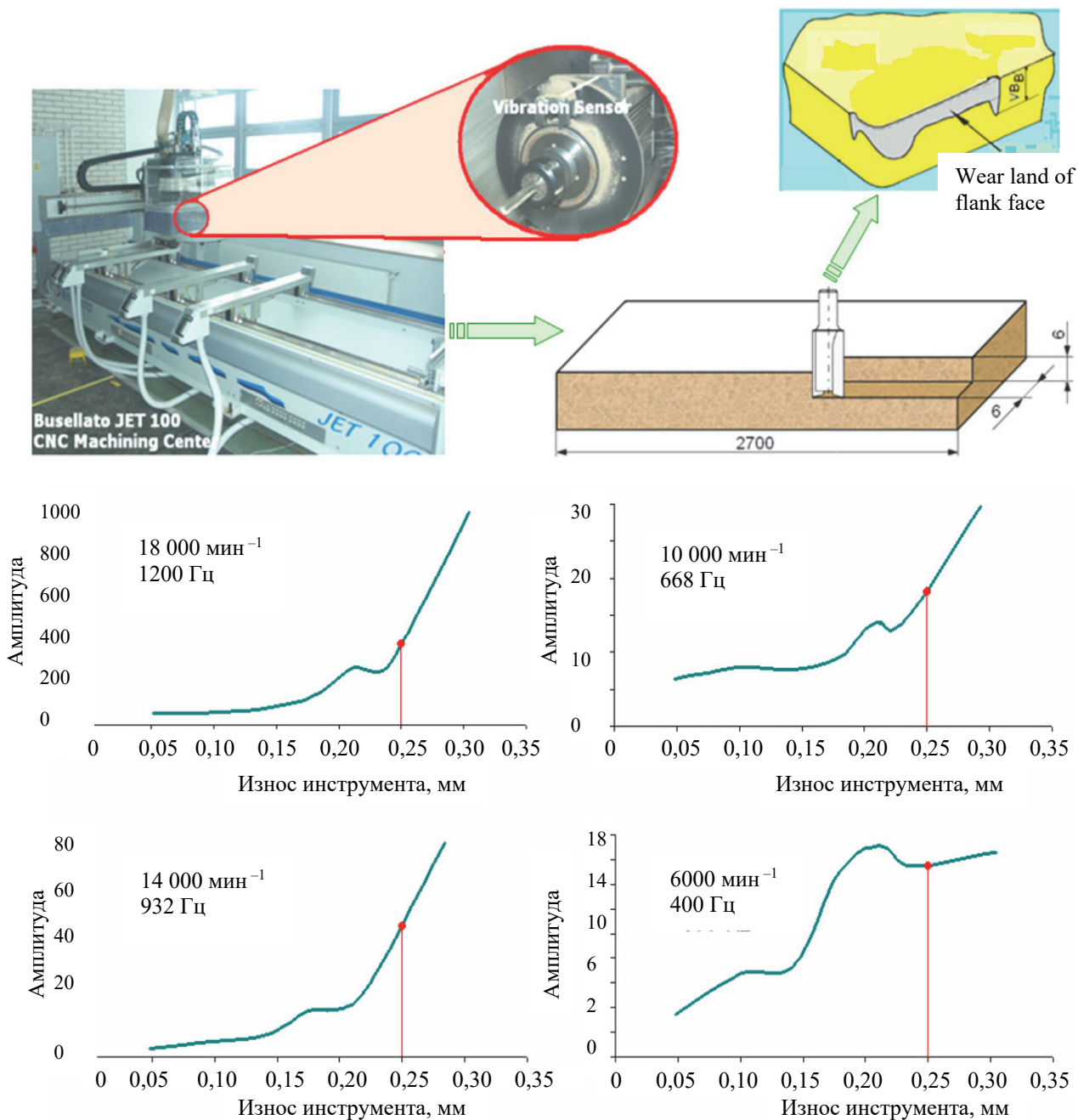


Рис. 1. Зарубежный опыт в изучении вибраций при резании материалов

Следует также обратить внимание и на зарубежный опыт изучения вибраций при резании различных материалов [7–22]. Схематично результаты изучаемых направлений можно представить в виде, изображенном на рис. 1–2. С точки зрения влияния вибрации на формирование силы в процессе разрушения древесины наиболее интересной следует считать задачу обработки материалов [21], при которой создаются напряжения сжатия, необходимые для снятия материала и создания вибрации. Схематично точение с использованием эллиптических вибраций представлено на рис. 3.

Возможности использования инструментальной адаптации на практике в промышленных условиях в основном определяют целесообразность применения и дальнейшего развития предлагаемой технологии механической обработки древесных материалов.

Рассматривая любую технологию как способ сохранения и увеличения ресурсов, инструментальную адаптацию можно внедрять в промышленность в качестве отдельной технологии путем создания нового типа оборудования и инструмента, а можно в уже используемые технологии вводить механическую обработку древесины, изменяя

при этом конструкцию используемого оборудования. Последний способ является наиболее простым, не предусматривающим высоких затрат ресурсов на использование новой технологии.

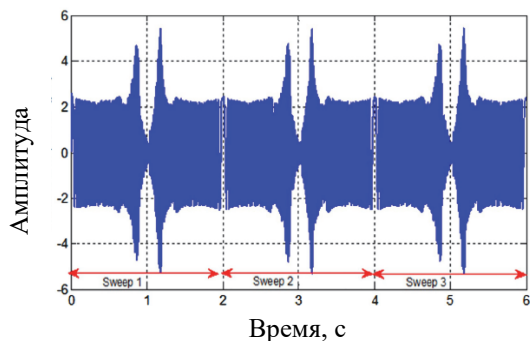


Рис. 2. Повышение качества фрезерования с использованием вибраций

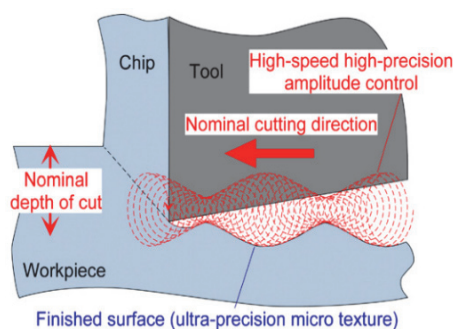


Рис. 3. Точение с использованием эллиптических вибраций

В общем случае внедрение инструментальной адаптации в привод механизма резания оборудования необходимо рассматривать с учетом

взаимного влияния как электромагнитных свойств двигателя, так и характеристик жесткости передач, участвующих в передаче крутящего момента к режущему инструменту.

Использование вибраций при инструментальной адаптации в конечном счете отражает условия высокоскоростного взаимодействия. Необходимо рассматривать относительное взаимодействие режущего инструмента с материалом не только как воздействие инструмента на заготовку, но и заготовки на инструмент, которая при обработке базируется в оборудовании.

Заключение. Таким образом, на примере обработки сталей можно сказать, что вибрации, обусловленные процессом резания с оптимальными параметрами (частотой и амплитудой), позволяют использовать их для улучшения механической обработки, т. е. превратить «вредные» вибрации в полезные путем адаптации их к условиям создания разрушающих напряжений в зоне резания. В частности, для цилиндрического фрезерования древесных материалов данные условия взаимодействия характеризуются циклоидальным характером образования поверхностей, и создание полезных вибраций следует рассматривать именно в процессе формирования циклоиды, чем и обоснована применяемая в данной работе модель инструмента. Создание «полезных» вибраций при взаимодействии инструмента с обрабатываемым материалом предлагается обеспечивать с помощью рабочих органов деревообрабатывающего оборудования с ЧПУ (механизмов резания, подачи и базирования), что позволит снизить энергоемкость процесса обработки и увеличить технологическую стойкость режущего инструмента.

Список литературы

1. Любченко В. И. Резание древесины и древесных материалов. М.: Лесная пром-сть, 1986. 296 с.
2. Волков С. А. Влияние динамических нагрузок на прочность и реологическое поведение твердых тел (о механизмах самоорганизации структур дефектов кристаллической решетки в зонах деформаций) // Синергетика и методы науки. СПб.: Наука, 1998. С. 131–155.
3. Волков С. А. Влияние скорости резания и вибрации на величину усилий в зоне среза // Строительные и дорожные машины: докл. к XXIV науч. конф. ЛИСИ. Л., 1966. С. 34–36.
4. Волков С. А. Физические основы рабочих процессов машин для изготовления арматуры железобетонных конструкций. СПб.: С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т, 2001. 125 с.
5. Применение ультразвука в промышленности / под ред. А. И. Маркова. М.: Машиностроение; София: Техника, 1975. 240 с.
6. Зельдович Л. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 686 с.
7. Dimla D. E. The Correlation of Vibration Signal Features to Cutting Tool Wear in a Metal Turning Operation // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2002. P. 705–713.
8. Szwajka K., Gorski J. Evaluation Tool Condition of Milling Wood on the Basis of Vibration Signal // Journal of Physics: Conference Series. 2006. No. 48. P. 1205–1209.
9. Philips S. Ogun, Michael R. Jackson. Active vibration control and real-time cutter path modification in rotary wood planing // Mechatronics Volume. 2017. No. 46. P. 21–31.
10. Gwo-Lianq Chern, Han-Jou Lee. Using workpiece vibration cutting for micro-drilling // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2006. No. 5. P. 688–692.

11. Use of cutting force and vibro-acoustic signals in tool wear monitoring based on multiple regression technique for compreg milling / Gorski J. [et al.] // Sensing tool wear in milling. *BioResources*. 2019. No. 14 (2). P. 3379–3388.
12. Tratar J., Pusavec F., Kopac J. Tool wear in terms of vibration effects in milling medium-density fibreboard with an industrial robot // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2014. No. 28 (11). P. 4421–4429.
13. Kovatchev G. Influence of the belt type over vibrations of the cutting mechanism in woodworking shaper // *Chip and chipless woodworking processes*. 2018. No. 11 (1). P. 105–110.
14. Fang X. D., Yao Y., Arndt G. Monitoring groove wear development in cutting tools via stochastic modelling of three-dimensional vibrations // *Elsevier Sequoia, Lausanne. Wear*. 1991. No. 151. P. 143–156.
15. The relationships between cutting parameters, tool wear, cutting force and vibration / Xu Chuangwen [et al.] // *Advances in Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 10 (1). P. 1–14.
16. Gochev Z., Vukov G. Influence of the wearing of the saw unit elements of the wood shaper on the system vibration // *Acta facultatis xylogologiae Zvolen*. 2017. No. 59 (2). P. 147–153.
17. Tian J. F., Hutton S. G. Cutting-induced vibration in circular saws // *Journal of Sound and Vibration*. 2001. No. 242 (5). P. 907–922.
18. Bhuiyan M. S. H., Choudhury I. A. Investigation of Tool Wear and Surface Finish by Analyzing Vibration Signals in Turning Assab-705 Steel // *Machining Science and Technology*. 2015. No. 19. P. 236–261.
19. Nasir V., Cool J. Intelligent wood machining monitoring using vibration signals combined with self-organizing maps for automatic feature selection // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. P. 202–217.
20. Corrosion of materials used as cutting tools of wood // M. Gauvent [et al.] // *Wear*. 2006. No. 261. P. 1051–1055.
21. Suzuki N., Yokoi H., Shamoto E. Micro/nano sculpturing of hardened steel by controlling vibration amplitude in elliptical vibration cutting // *Precision Engineering*. 2011. No. 35. P. 44–50.
22. Gwo-Lianq Chern, Yuan-Chin Chang. Using two-dimensional vibration cutting for micro-milling // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2006. No. 46. P. 659–666.

References

1. Lyubchenko V. I. *Rezaniye drevesiny i drevesnykh materialov* [Cutting wood and wood materials]. Moscow, Lesnaya promyslennost' Publ., 1986. 296 p. (In Russian)
2. Volkov S. A. The influence of dynamic loads on the strength and rheological behavior of solids (on the mechanisms of self-organization of crystal lattice defect structures in deformation zones). *Sinergetika i metody nauki* [Synergetics and methods of Science]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1998, pp. 131–155 (In Russian).
3. Volkov S. A. The influence of cutting speed and vibration on the amount of effort in the cut zone. *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny: doklady k XXIV nauchnoy konferentsii Leningradskogo inzhenerno-stroitel'nogo instituta* [Construction and road machines: report to XXIV scientific conference Leningrad Institute of Civil Engineering]. Leningrad, 1966, pp. 34–36 (In Russian).
4. Volkov S. A. *Fizicheskiye osnovy rabochikh protsessov mashin dlya izgotovleniya armatury zhelezobetonnykh konstruktsiy* [Physical bases of working processes of machines for the manufacture of reinforcement of reinforced concrete structures]. St. Petersburg, St. Petersburg university of State Architecture and Civil Engineering Publ., 2001. 125 p. (In Russian).
5. *Primeneniye ul'trazvuka v promyshlennosti* [Application of ultrasound in industry]. Ed. by A. I. Markov. Moscow, Mashinostroyeniye Publ.; Sofia, Tekhnika Publ., 1975. 240 p. (In Russian).
6. Zeldovich L. B., Rajzer Yu. P. *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy* [Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 686 p. (In Russian).
7. Dimla D. E. The Correlation of Vibration Signal Features to Cutting Tool Wear in a Metal Turning Operation. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2002, no. 19, pp. 705–713.
8. Szwajka, K. Górski J. Evaluation Tool Condition of Milling Wood on the Basis of Vibration Signal. *Journal of Physics: Conference Series*, 2006, no. 48, pp. 1205–1209.
9. Philips S. Ogun, Michael R. Jackson. Active vibration control and real-time cutter path modification in rotary wood planning. *Mechatronics Volume*, 2017, no. 46, pp. 21–31.
10. Gwo-Lianq Chern, Han-Jou Lee. Using workpiece vibration cutting for micro-drilling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2006, no. 5, pp. 688–692.

11. Gorski J., Szymanowski K., Podziewski P., Smietanska K., Charniak P., Cyrankowski M. Use of cutting force and vibro-acoustic signals in tool wear monitoring based on multiple regression technique for compreg milling. *Sensing tool wear in milling. BioResources*, 2019, no. 14 (2), pp. 3379–3388.

12. Tratar J., Pusavec F., Kopac J. Tool wear in terms of vibration effects in milling medium-density fibreboard with an industrial robot. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, no. 28 (11), pp. 4421–4429.

13. Kovatchev G. Influence of the belt type over vibrations of the cutting mechanism in woodworking shaper. *Chip and chipless woodworking processes*, 2018, no. 11 (1), pp. 105–110.

14. Fang X. D., Yao Y., Arndt G. Monitoring groove wear development in cutting tools via stochastic modelling of three-dimensional vibrations. *Elsevier Sequoia, Lausanne. Wear*, 1991, no. 151, pp. 143–156.

15. Chuangwen Xu, Dou Jianming, Chai Yuzhen, Li Huauiyuan, Shi Zhicheng, Xu Jing. The relationships between cutting parameters, tool wear, cutting force and vibration. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10 (1), pp. 1–14.

16. Gochev Z., Vukov G. Influence of the wearing of the saw unit elements of the wood shaper on the system vibration. *Acta facultatis xylologiae Zvolen*, 2017, no. 59 (2), pp. 147–153.

17. Tian J. F., Hutton S. G. Cutting-induced vibration in circular saws. *Journal of Sound and Vibration*, 2001, no. 242 (5), pp. 907–922.

18. Bhuiyan M. S. H., Choudhury I. A. Investigation of Tool Wear and Surface Finish by Analyzing Vibration Signals in Turning Assab-705 Steel. *Machining Science and Technology*, 2015, no. 19, pp. 236–261.

19. Nasir V., Cool J. Intelligent wood machining monitoring using vibration signals combined with self-organizing maps for automatic feature selection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, pp. 202–217.

20. Gauvent M., Rocca E., Meausoone P. J., Brenot P. Corrosion of materials used as cutting tools of wood. *Wear*, 2006, no. 261, pp. 1051–1055.

21. Suzuki N., Yokoi H., Shamoto E. Micro/nano sculpturing of hardened steel by controlling vibration amplitude in elliptical vibration cutting. *Precision Engineering*, 2011, no. 35, pp. 44–50.

22. Gwo-Lianq Chern, Yuan-Chin Chang. Using two-dimensional vibration cutting for micro-milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, no. 46, pp. 659–666.

Информация об авторах

Гаранин Виктор Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: garanin@wmt.by

Раповец Вячеслав Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: slavyan_r@mail.ru

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

Алифировец Григорий Васильевич – инженер кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: alifirovez@tut.by

Information about the authors

Garanin Victor Nikolaevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: garanin@wmt.by

Rapovets Vyacheslav Valer'yevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: slavyan_r@mail.ru

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

Alifirovets Grigoriy Vasil'yevich – engineer, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alifirovez@tut.by

Поступила 21.10.2022

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ ЛЕСАМИ, ЛЕСОУСТРОЙСТВО И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ	5
Ермохин М. В., Игнатъев Я. К., Старикова Л. И. Влияние климатических факторов на динамику радиального прироста бука лесного и псевдотсуги Мензиса	5
ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЕ И ЛЕСОРАЗВЕДЕНИЕ	14
Машкин И. А., Макеенко А. А., Шуканов В. П., Мельникова Е. В., Корытько Л. А., Полянская С. Н. Использование отходов химической деструкции торфа от производства препарата «Гидрогумат» для повышения качества семян и сеянцев сосны (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	14
Носников В. В., Alam M. Проблемы восстановления лесов в Ливанской Республике....	23
Юрениа А. В., Якимов Н. И., Юрениа Е. Г. Адаптация древесных растений при лесной рекультивации илового пруда УП «Минскводоканал»	34
ЛЕСОЗАЩИТА И САДОВО-ПАРКОВОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО	41
Баранов О. Ю., Иващенко Л. О. Разработка набора праймеров для диагностики офи- стомовых грибов, ассоциированных с процессами усыхания дуба черешчатого	41
Ермохин М. В., Сазонов А. А., Игнатъев Я. К. Биологическая устойчивость лесов различного происхождения	49
Сазонов А. А., Кухта В. Н., Романенко М. О., Салук С. В. Синяя сосновая златка (<i>Phaenops cyanea</i> (Fabricius, 1775)) – новая угроза лесам Беларуси	61
ТУРИЗМ И ЛЕСООХОТНИЧЬЕ ХОЗЯЙСТВО	73
Гордей Д. В., Морозов О. В. Урожайность и параметры ягод межвидовых гибридов голу- бики в комбинации скрещивания (<i>Vaccinium corymbosum</i> L. (Spartan, Duke) ♀ × <i>Vaccinium angustifolium</i> Ait. ♂), культивируемых на верховом торфянике Белорусского Поозерья	73
ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС. ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ	83
Вавилов А. В. Эффективная техника для выборочных рубок и лесовосстановления	83
Духовник А. А., Мохов С. П. Оценка методов и приемов проведения рубок ухода за лесом системой машин «харвестер – форвардер» в Республике Беларусь (обзор)	88
Ким Ю. А., Насковец М. Т., Войтеховский Б. В., Сивицкая Д. Д. О повышении проходимости внедорожного колесного транспортного средства	98
Леонов Е. А., Клоков Д. В. Анализ применения систем машин для лесозаготовок в ОАО «Витебскдрев»	104
Мисуно Ю. И., Протас П. А., Москальчук Л. Н. Применение систем автоматизированного проектирования для оценки взаимодействия пневматических шин с лесными почвогрунтами	111
Шошин А. О. Экспериментальные исследования мобильной канатной трелевочной установки в равнинных условиях	121
Панкратович А. С., Протас П. А. Анализ критериев оптимизации транспортно- логистических операций лесозаготовительного производства	133
Насковец М. Т., Красковский С. В., Жлобич П. Н., Четырбок А. Н. Анализ компо- нентной структуры транспортной сети лесного фонда, опыт устройства подъездных лесо- транспортных путей с упрочняющими прослойками	139

ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ	147
Романенко В. В., Невзорова А. Б. Комплексный подход к оценке факторов, влияющих на надежность работы деревянных шпал	147
Игнатович Л. В., Куневич В. О., Гордиевич Е. И. Применение информационных технологий при проектировании мягкой мебели	156
Шелемет Н. Ю., Чуйков А. С. Геометрические особенности конструктивных элементов и требования, предъявляемые к клюшкам для хоккея на траве (обзор)	165
Кузьмин В. А., Радкевич Л. В., Пастори З., Божелко И. К., Федосенко И. Г., Дубовская Л. Ю., Коновалова А. А., Мелешко О. В. Использование коры в производстве теплоизоляционных строительных материалов (обзор)	177
Федосенко И. Г., Дребушевич М. И. Особенности конструирования плитных материалов из коры сосны на минеральных вяжущих	187
Леонович О. К., Божелко И. К., Коняхина О. В. Снижение эмиссии формальдегида водостойкой фанеры	194
ОБЩЕИНЖЕНЕРНЫЕ ВОПРОСЫ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА	201
Чарнушэвіч Р. А., Дамнянкова А. У., Кісялёў С. У., Азоўская Н. А. Асаблівасці арганізацыі харчавання насельніцтва ва ўмовах павышанай радыяцыйнай рызыкі	201
Гаранин В. Н., Раповец В. В., Машорипова Т. А., Алифировец Г. В. Вибрационное резание древесных материалов на станках с числовым программным управлением	208

CONTENTS

FOREST MANAGEMENT, FOREST INVENTORY AND INFORMATION SYSTEMS IN FORESTRY	5
Yermokhin M. V., Ignatiev Ya. K., Starikova L. I. Impact of climatic factors on tree-ring dynamics of European beech and Douglas fir	5
FOREST REGENERATION AND FOREST GROWING	14
Mashkin I. A., Makeenko A. A., Shukanov V. P., Melnikowa E. V., Korytsko L. A., Poljanskaja S. N. The use of peat chemical destruction waste from the production of the Hydrohumate preparation to improve the quality of pine seeds and seedlings (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	23
Nosnikov V. V., Alam M. Problems of reforestation in the Lebanese Republic	23
Yurenya A. V., Yakimov N. I., Yurenya E. G. Adaptation of woody plants during forest reclamation of silt pond unitary enterprise “Minskvodokanal”	34
FOREST PROTECTION AND LANDSCAPING	41
Baranov O. Yu., Ivashchenko L. O. Development of a set of primers for the diagnosis of ophiostoma fungi associated with drying processes of English oak	41
Yermokhin M. V., Sazonov A. A., Ignatiev Ya. K. Biological stability of forests of different origin	49
Sazonov A. A., Kukhta V. N., Ramanenka M. A., Saluk S. V. Steelblue Jewel Beetle (<i>Phaenops cyanea</i> (Fabricius, 1775)) – a new threat to the forests of Belarus	61
TOURISM AND FOREST HUNTING	73
Gordey D. V., Morozov O. V. Yield and parameters of berries of interspecific blueberry hybrids in a crossing combination (<i>Vaccinium corymbosum</i> L. (Spartan, Duke) ♀ × <i>Vaccinium angustifolium</i> Ait. ♂) cultivated on peat bogs in Belarusian Lakeland	73
TIMBER PROCESSING COMPLEX. TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL QUESTIONS	83
Vavilov A. V. Efficient technology for selected felling and forest regeneration	83
Dukhovnik A. A., Mokhov S. P. Evaluation of methods and techniques for preparation felling behind the forest with a system of machines “harvester – forwarder” in the Republic of Belarus (review)	88
Kim Yu. A., Naskovets M. T., Voitekhovsky B. V., Sivitskaya D. D. About increasing the performance of off-road wheels vehicle	98
Leonov E. A., Klokov D. V. The use analysis of machine systems for logging at JSC “Vitebskdrev”	104
Misuno Yu. I., Protas P. A., Moskalchuk L. N. Application of computer-aided design systems to assess the interaction of pneumatic tires with forest soils	111
Shoshyn A. O. Experimental researches of the cable yarder in flat cutting areas	121
Pankratovich A. S., Protas P. A. Analysis of criteria for optimization of transport and logistics operations of logging production	133
Naskovets M. T., Kraskovsky S. V., Zhlobich P. N., Chetyrbok A. N. Analysis of the component structure of the forest transport network foundation, experience in the construction of access forest transport routes with reinforcing layers	139

WOODWORKING INDUSTRY	147
Romanenko V. V., Neuzorova A. B. Integrated approach to the assessment of factors affecting the reliability of wooden sleepers	147
Ignatovich L. V., Kunevich V. O., Gordiyevich E. I. Application of information technologies in the design of upholstered furniture	156
Shelemet N. Yu., Chuikov A. S. Geometric features of structural elements and requirements for field hockey sticks (review)	165
Kuzmin V., Radkevich L., Pásztor Z., Bazhelka I., Fedosenko I., Dubovskaya L., Kanavalaya A., Meleshko O. Use of bark in the production of thermo insulating building materials (review)	177
Fedosenko I. G., Drebushevich M. I. Features of construction of plate materials from pine bark on mineral binders	187
Leonovich O. K., Bazhelka I. K., Konyakhina O. V. Reduced emissions of formaldehyde water-resistant plywood	194
ALL-ENGINEERING QUESTIONS OF TIMBER PROCESSING COMPLEX	201
Chernushevich G. A., Domnenkova A. V., Kiselev S. V., Azovskaya N. O. Problems of food supply for population under increased radiation risks	201
Garanin V. N., Rapovets V. V., Mashoripova T. A., Alifirovets G. V. Vibration cutting of wood materials on machines with numerical control	208

Редактор *Т. Е. Самсанович*
Компьютерная верстка *П. М. Никитина*
Корректор *Т. Е. Самсанович*

Подписано в печать 20.01.2023. Формат 60×84¹/₈.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 25,5. Уч.-изд. л. 27,3.
Тираж 27 экз. Заказ 37.

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.