

№20 (4)

ISSN 2307-0048

Resources and Technology

научный журнал

2023

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Resources and Technology

№20 (4)

Сетевое издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 - 57768 от 18.04.2014.

Учредитель – ФГБОУ ВО Петрозаводский государственный университет.

Адрес электронной почты журнала: rt@petsu.ru. Номер телефона: 8 (8142) 76-97-11.

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

Resources and Technology

№20 (4)

Mass media registration certificate #ΦC77-57768 (18/04/2014).

Founder: Petrozavodsk State University.

E-mail: rt@petsu.ru. Phone number: 8 (8142) 76-97-11.

Редакционная коллегия:

Главный редактор:

Васильев Сергей Борисович (Россия) доктор технических наук, профессор, *servas@psu.karelia.ru*.

Заместитель главного редактора:

Колесников Геннадий Николаевич (Россия) доктор технических наук, профессор, *kgn@psu.karelia.ru*.

Тихонов Евгений Андриянович (Россия) кандидат технических наук, доцент, *tihonov@psu.karelia.ru*.

Редакционный совет:

Гаврилова Ольга Ивановна (Россия) доктор сельскохозяйственных наук, профессор, *ogavril@mail.ru*.

Добрынина Оксана Леонидовна (Россия) Кандидат педагогических наук, доцент, *oksdobr@mail.ru*.

Григорьев Игорь Владиславович (Россия) Доктор технических наук, профессор, *silver73@inbox.ru*.

Карвинен Сари (Финляндия) Магистр естественных наук, *sari.karvinen@metla.fi*.

Левин Валерий Михайлович (Мексика) Доктор физико-математических наук, профессор,
vlevine@imp.mx.

Ледницкий Андрей Викентьевич (Республика Беларусь) Кандидат экономических наук, доцент,
ledniz@inbox.ru.

Мануковский Андрей Юрьевич (Россия) Доктор технических наук, профессор, *mayu1964@mail.ru*.

Мельник Пётр Григорьевич (Россия) Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, *melnik_petr@bk.ru*.

Саастамойнен Олли (Финляндия) Доктор наук, *olli.saastamoinen@uef.fi*.

Саливоник Александр Владимирович (Россия) Кандидат технических наук, *salivonik@rambler.ru*.

Сюнёв Владимир Сергеевич (Россия) Доктор технических наук, профессор, *siounev@psu.karelia.ru*.

Editorial staff:

Editor-in-chief:

Prof. Dr. Vasilyev, Sergey (Russia), *servas@psu.karelia.ru*.

Deputy editor:

Prof. Dr. Kolesnikov, Gennady (Russia), *kgn@psu.karelia.ru*.

Prof. Dr. Tikhonov, Eugeny (Russia), *tihonov@psu.karelia.ru*.

Editorial board:

Prof. Dr. Gavrilova, Olga I. (Russia), *ogavril@mail.ru*.

Dr. Dobrinina, Oksana (Russia), *oksdobr@mail.ru*.

Prof. Dr. Grigoryev, Igor (Russia), *silver73@inbox.ru*.

M. Sc. Karvinen, Sari (Finland), *sari.karvinen@metla.fi*.

Prof. Dr. Levin, Valery (Mexico), *vlevine@imp.mx*.

Prof. Dr. Lednitskij, Andrej (Belarus), *ledniz@inbox.ru*.

Prof. Dr. Manukovsky, Andrey (Russia), *mayu1964@mail.ru*.

Dr. Melnik, Petr (Russia), *melnik_petr@bk.ru*.

Prof. Emeritus, Dr. Sc., Saastamoinen Olli (Finland), *olli.saastamoinen@uef.fi*.

Prof. Dr. Salivonik, Alexander (Russia), *salivonik@rambler.ru*.

Prof. Dr. Syunev, Vladimir (Russia), *siounev@psu.karelia.ru*.

Содержание №4, Т. 20, 2023

Теринов Н. Н., Герц Э. Ф., Мехренцев А. В., Залесов С. В., Терехов Г. Г., Толкач О. В. Васильев В. В.	Технологические схемы использования мини-тракторов на рубках ухода за лесом Экспериментальное определение коэффициента полнодревесности усовершенствованной плоской сплочной единицы	1 - 27 28 - 44
Борисов В. А., Акинин Д. В., Гасилина М. А., Романова А. Р.	Теплопроводность снежного покрова и физические процессы, происходящие в нём под влиянием температурного градиента	45 - 73
Скобцов И. Г., Галактионов О. Н., Сулконен М. С.	Исследование надёжности модульной системы пожаротушения на базе форвардера Амкодор-2661	74 - 88
Трушевский П. В., Куницкая О. А., Должиков И. С., Макуев В. А., Ревяко С. И., Григорьева О. И.	Анализ технических и технологических решений очистки лесосек от порубочных остатков	89 - 138
Артёмов А. В., Бурындин В. Г., Ершова А. С., Захаров П. С.	Исследование влияния и распределения порошкообразного гидролизного лигнина в древесном наполнителе на эксплуатационные и эстетические характеристики пластика без применения связующего	139 - 159
Степанов А. В., Груздов А.	Экспериментальная оценка состояния дорог Карелии, подверженных активному воздействию лесовозного транспорта	160 - 173

Content №4, Vol. 20, 2023

<i>Terinov N. N., Hertz E. F., Mehrentsev A. V., Zalesov S. V., Terekhov G. G., Tolkach O. V.</i>	Technological schemes of using mini-tractors for cleaning cutting in forest	1 - 27
<i>Vasiliev V. V.</i>	Experimental determination of the stacked volume ratio of an improved flat-flow unit	28 - 44
<i>Borisov V., Akinin D., Gasilina M., Romanova A.</i>	Thermal conductivity of snow cover and physical processes occurring in it under the influence of temperature gradient	45 - 73
<i>Skobtsov I. G., Galaktionov O., Sulkonen M.</i>	Research of the reliability of a modular fire extinguishing system based on the forwarder Amkodor-2661	74 - 88
<i>Trushevsky P., Kunitskaya O., Dolzhikov I., Makuev V., Revyako S., Grigoreva O.</i>	Analysis of technical and technological solutions for clearing cutting areas from felling residues	89 - 138
<i>Artyomov A. V., Buryndin V. G., Ershova A. S., Zakharov P. S.</i>	The influence and distribution of powdered hydrolytic lignin in wood filler on the operational and aesthetic characteristics of binderless plastic	139 - 159
<i>Stepanov A., Gruzlov A.</i>	Experimental assessment of the condition of Karelia roads exposed to the active logging transport traffic	160 - 173

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7263

УДК 630*24; 630*375.9

Статья

Технологические схемы использования мини-тракторов на рубках ухода за лесом

Теринов Николай Николаевич

доктор сельскохозяйственных наук, ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук» (Российская Федерация), n_n_terinov@mail.ru

Герц Эдуард Фёдорович

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (Российская Федерация), gerz.e@mail.ru

Мехренцев Андрей Вениаминович

Кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (Российская Федерация), mehrentsev@yandex.ru

Залесов Сергей Вениаминович

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (Российская Федерация), zalesov@usfeu.ru

Терехов Геннадий Григорьевич

доктор сельскохозяйственных наук, ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук» (Российская Федерация), terekhov_g_g@mail.ru

Толкач Ольга Владимировна

доктор сельскохозяйственных наук, ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук» (Российская Федерация), tolkach_o_v@mail.ru

Получена: 28 июля 2023 / Принята: 5 октября 2023 / Опубликовано: 12 октября 2023

Аннотация: Цель исследования — опробовать в реальных условиях и предложить производству ряд технологических схем использования мини-тракторов в качестве трелёвочных механизмов на рубках ухода за лесом. Одним из достоинств этого вида техники на выборочных рубках является возможность трелёвки древесины без разрубки технологических коридоров. Другое достоинство — это сохранение живого напочвенного покрова и верхних горизонтов почвы в процессе трелёвки заготовленной древесины на прицепном

устройстве. В качестве трелёвочного механизма был использован опытный образец мини-трактора МТР-1, созданный при участии студентов и преподавателей Уральского государственного лесотехнического университета. В работе представлены результаты трёхлетних испытаний опытного образца трелёвочного мини-трактора МТР-1 на проходных рубках в насаждениях искусственного и естественного происхождения. Опробован ряд схем беспасечной технологии лесосечных работ. Сделан вывод, что при выборе схемы разработки лесосеки этим способом необходимо учитывать конфигурацию отведённого в рубку участка, его рельеф, наличие прогалин, лесных и грунтовых дорог. Установлено, что при проведении всего комплекса лесозаготовительных работ одним человеком реальная производительность мини-трактора на трелёвке леса составляет 3,0—3,5 м³/смену. В случае трелёвки крупных сортиментов и с целью снижения площади соприкосновения их с поверхностью рекомендовано осуществлять этот процесс по подкладочным деревьям. Дистанционное управление лебёдкой позволило эффективно использовать мини-трактор в качестве самоходной лебёдки на начальном этапе разработки лесосеки, сократить время погрузки сортиментов на погрузочное устройство и увеличить объём заготовленной древесины до 4 м³/смену. Кроме того, это устройство по времени позволило синхронизировать работу двух человек на операциях, с одной стороны связанных с рубкой деревьев и заготовкой сортиментов, с другой — с их трелёвкой и штабелёвкой. При таком варианте бригадой из двух человек объём заготовленной древесины составляет 7,5 м³/смену и сокращается время освоения лесосеки.

Ключевые слова: мини-трелёвщик; беспасечная технология лесосечных работ

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7263

Article

Technological schemes of using mini-tractors for cleaning cutting in forest

Nikolay Terinov

D. Sc. in agriculture, Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Russian Federation), n_n_terinov@mail.ru

Eduard Hertz

D. Sc. in engineering, professor, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), gerz.e@mail.ru

Andrey Mehrentsev

PhD in engineering, associate professor, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), mehrentsev@yandex.ru

Sergey Zalesov

D. Sc. in agriculture, professor, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), zalesov@usfeu.ru

Gennady Terekhov

D. Sc. in agriculture, Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Russian Federation), terekhov_g_g@mail.ru

Olga Tolkach

D. Sc. in agriculture, Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Russian Federation), tolkach_o_v@mail.ru

Received: 28 July 2023 / Accepted: 5 October 2023 / Published: 12 October 2023

Abstract: The study is aimed at testing and proposing some technological schemes for using mini-tractors as skidding mechanisms for cleaning cutting in forest. One of the advantages of this type of equipment on selective cuttings is the possibility to skid wood without cutting technological corridors in the forest. . Another advantage is the preservation of the ground vegetation and topsoil during the skidding of the harvested wood on the loading device. The MTR-1 mini-tractor created by students and staff of the Ural State Forestry University was used as a skidding mechanism. The article presents the results of three-year tests of an experimental mini-forwarder MTR-1 performance during severance cuttings in artificial and natural forests. Some

technologies excluding cutting roads during logging operations have been tested. It is concluded that when choosing a scheme for the development of a cutting area it is necessary to take into account the configuration of the cutting area, its relief, the presence of glades, forest and dirt roads, and the trees location. It has been established that when the entire complex of cutting operations is performed by one person, the real productivity of a mini-tractor on wood skidding is 3.0—3.5 m³ per working day. It is recommended to use dunnage timber when skidding large logs to reduce the area of their contact with the surface. Remote control of the winch allowed the mini-tractor effective usage as a self-propelled winch at the initial stage of the cutting area development, to reduce the loading time of the logs and to increase the volume of harvested wood to 4 m³ per working day. In addition, this device allowed synchronizing the work of two people during operations that included short-length logging, skidding and stockpiling. Thus two people harvested 7.5 m³ per working day reducing the period of the cutting area development.

Keywords: mini-skidder; technology excluding cutting roads

1. Введение

Выращивание высокопродуктивных, устойчивых лесных насаждений, успешно выполняющих природосберегающие и природообразующие функции, является одной из основных задач лесоводства. Практическая её реализация сопровождается соответствующими мероприятиями. Так, в процессе формирования насаждения от молодняка до приспевающего древостоя действующими Правилами ухода за лесами регламентировано периодическое проведение на одних и тех же участках (таксационных выделах) рубок ухода за лесом [1]. До 20 лет — это осветление и прочистка, далее до возраста приспевания — прореживание и проходная рубка. При любом вмешательстве в естественный ход лесообразовательного процесса, будь то причины антропогенного или природного характера, лесная экосистема в той или иной степени испытывает стрессовое состояние. Это может быть ветровал, лесной пожар, уничтожение подроста и повреждение деревьев в процессе лесозаготовки, развитие эрозионных процессов, в результате уплотнение и разрушение верхних горизонтов почвы. Часто все это проявляется в той или иной степени комплексно.

Восстановление экосистемы до состояния, близкого к исходному (демутация), по времени соизмеримо с масштабами её нарушения. Рубка леса, наряду с пожарами и катастрофическими ветровалями, является одним из факторов, существенно влияющих на современный облик лесов. Если предотвратить природные пожары и ветровалы человечество пока не в силах, то при проведении лесозаготовительных работ имеются технические средства и технологии, позволяющие свести негативные последствия рубок к минимуму. Одним из таких средств является малогабаритная трелёвочная техника с низким удельным давлением на почву. Она может успешно применяться на рубках ухода за лесом [2] и в тех случаях, когда использование других механизмов небезопасно, невыгодно [3] или приводит к существенному нарушению природной среды [4]. В частности, объектом её применения являются леса, относящиеся к категории «защитные» (городские, пригородные, водоохранные, противозрозионные леса, запретные полосы вдоль рек, берегозащитные участки и т. д.). В них к сохранению природной среды предъявляются повышенные требования, и в этом отношении природосберегающую роль подобного класса техники трудно переоценить [5].

Трелёвочные мини-тракторы производятся и успешно используются при проведении рубок в зарубежных странах [6—8]. В России специализированная малогабаритная лесозаготовительная техника серийно не выпускается и существует только в качестве опытных образцов. Следовательно, отсутствуют технологии, адаптированные к местным условиям.

На основе экспериментального материала, полученного в результате опытно-производственных работ в древостоях искусственного и естественного происхождения, предлагается ряд технологических схем по использованию трелёвочного мини-трактора на рубках ухода за лесом. Хочется надеяться, что прошедшие производственную проверку технологии вызовут интерес лесных предприятий и муниципальных образований

в приобретении подобной техники. В свою очередь, это подтолкнёт машиностроительные предприятия к производству этого вида отечественного оборудования.

2. Материалы и методы

Прежде всего, следует определиться с тем, какую категорию механизмов следует отнести к мини-тракторам. Согласно информации, помещённой в «Справочнике по технологическим и транспортным машинам лесопромышленных предприятий и техническому сервису» под общей редакцией В. В. Быкова, А. Ю. Тесовского [9], малогабаритная техника в зависимости от массы и мощности двигателя подразделяется на лёгкую, среднюю и тяжёлую (таблица 1).

Таблица 1. Типы малогабаритных тракторов

Table 1. Mini-tractors types

Тип	Конструкционная масса, кг	Номинальная мощность двигателя, кВт	Максимальная скорость, км/ч		Ширина колеи (не более), мм
			рабочая	транспортная	
Малогабаритные тракторы двухосные (гусеничные)					
Лёгкий	до 500	до 10	6	15	800
Средний	500—650	10—14	6	25	800
Тяжёлый	свыше 650	14—16	6	25	1200

Оборудованные специальными приспособлениями для трелёвки леса малогабаритные тракторы при определённых таксационных характеристиках древостоев и типах лесорастительных условий можно успешно использовать на рубках ухода за лесом в течение всего года. Основываясь на данных таблицы 1, лёгкие малогабаритные тракторы можно отнести к группе «мини-трелёвщики» или «мини-форвардеры», а средние и тяжёлые — к группе «малогабаритные трелёвочные тракторы» или «малогабаритные форвардеры». Наиболее известным представителем первого типа техники является семейство мини-форвардеров Iron Horse («Железный конь») (фото 1). Ширина мини-трелёвщика 1,1 м, длина 1,7 м, масса 350 кг. На машине установлен двигатель мощностью 8,8 л. с. (6,5 кВт). Для сравнения модель Scottrac OX14, выпускаемая шведской фирмой Artcom Tradebridge Ltd, относится к представителям группы малогабаритных трелёвочных тракторов среднего типа (фото 2). Эта машина комплектуется двигателем мощностью 14 л. с. (10,3 кВт). Масса машины с лебёдкой составляет 500 кг, длина 1,7 м, ширина 1,2 м.

Для проведения наших исследований использовался опытный образец мини-трактора МТР-1, разработанный и созданный студентами и преподавателями Уральского государственного лесотехнического университета. В первоначальном виде мини-трактор МТР-1 напоминал мини-форвардер производства Швеции.



Фото 1. Мини-трелёвщик ИН 2055PW (Швеция)

Photo 1. Mini-skidder IH 2055PW (Sweden)



Фото 2. Малогабаритный трелёвщик Scottrac OX14 (Швеция)

Photo 2. Small-sized skidder Scottrac OX14 (Sweden)

В процессе эксплуатации производилась его модернизация. Первый её этап состоял в изменении компоновки механизма и системы управления. Вместо манипулятора, с помощью которого осуществлялось управление механизмом в пешем состоянии, было оборудовано место водителя. Рядом разместились педаль для регулировки оборотов двигателя и рычаг переключения направления движения мини-трактора (вперёд —

нейтральное положение — назад). Лебёдку, используемую для подтаскивания и погрузки сортиментов на прицепное устройство, установили в задней части мини-трактора, а механизм для её управления — под сиденьем водителя. Место водителя оградили защитным щитом (фото 3). На втором этапе было усовершенствовано управление лебёдкой: трелёвка и погрузка сортиментов стала осуществляться дистанционно, с помощью радиосигнала [10]. Для транспортировки мини-трактора с прицепным устройством обходились бортовым автомобилем УАЗ-3303. Технические характеристики мини-трактора МТР-1 представлены в таблице 2. Согласно данным таблицы 1, он относится к лёгкому типу малогабаритных тракторов.



Фото 3. Опытный образец мини-трактора МТР-1

Photo 3. Prototype of the MTR-1 mini-tractor

Опытно-производственная проверка МТР-1 производилась в течение 3 лет в насаждениях естественного и искусственного происхождения. Рассматривались только безопасные технологии разработки лесосек, т. е. возможность использования механизма на трелёвке леса без рубки технологических коридоров. На всех участках перед проведением лесосечных работ, согласно инструкции, закладывались пробные лесоустроительные площади (ОСТ 56-69-83). На каждой пробной площади производился сплошной перелёт

деревьев, на основе которого с помощью таблиц устанавливалась таксационная характеристика насаждения. Для определения интенсивности рубки после её окончания на пробной площади производился повторный пересчёт деревьев. Ежедневно после окончания работы производился обмер стрелёванных сортиментов и по таблицам определялся объём заготовленной древесины.

Таблица 2. Технические характеристики мини-трактора МТР-1

Table 2. Technical characteristics of the MTR -1 mini-tractor

Параметр	Значение
Масса, кг	Около 300
Грузоподъёмность, кг	500
Рейсовая нагрузка, м ³	0,5—0,8
Удельное давление на почву, кг/см ²	0,15
Тип движителя	Гусеничный
Двигатель	Карбюраторный, одноцилиндровый, четырёхтактный
Мощность двигателя, кВт /л. с.	5,1/7,0
Длина, м	1,6
Ширина, м	1,1
Оснащение	Прицепное устройство, лебёдка механическая

Все лесозаготовительные работы проводились в летний период. При разработке технологий рубок с применением мини-трактора МТР-1 исходили из принципа максимального сохранения лесорастительной среды, древостоя и минимального расстояния и удобного маршрута трелёвки заготовленной древесины к месту погрузки на автотранспорт. При этом внимание уделялось рельефу отведённого в рубку участка, форме лесосеки, наличию и состоянию дорожно-тропиночной сети, расположению деревьев. Весь комплекс работ по заготовке древесины на рубках ухода осуществлялся одним человеком. Валка, обрезка ветвей и раскряжёвка хлыстов на сортименты длиной от 3 до 6 м производилась бензомоторной пилой Stihl-250, трелёвка — мини-трактором МТР-1, оборудованным прицепным устройством. Порубочные остатки складировались в кучи для последующего сжигания в пожаробезопасный период. В результате были предложены беспасечные технологии разработки лесосеки с использованием мини-трактора на трелёвке древесины.

3. Результаты

Первое исследование проведено на территории Уральского учебно-опытного лесхоза Уральского государственного лесотехнического университета (УГЛТУ) (Билимбаевское

лесничество, участок Северский, кв. 38, выд. 23). Объектом исследования являлся участок площадью 2,2 га, отведённый под проходную рубку в сосняке ягодниковом I класса бонитета. Интенсивность рубки планировалась в объёме 15 % от исходного запаса древостоя до рубки (фото 4).



Фото 4. Древостой, отведённый под проходную рубку

Photo 4. Forest stand for severance cutting

Размещение деревьев по площади лесосеки — равномерное. Участок характеризуется неоднородным рельефом, особенно в северной и восточной его частях: отмечено значительное количество микроповышений и микропонижений, имеющих искусственное происхождение. Это в определённой степени затрудняло погрузку сортиментов на погрузочное устройство и прохождение загруженного поезда по короткому маршруту. Через участок проходит лесная дорога, примыкающая на юге к грунтовой дороге и делящая лесосеку практически на две равные части. По северной стороне лесосеки с выходом на грунтовую дорогу проходит магистральный волок, который был прорублен при проведении выборочной санитарной рубки на смежном участке. Его состояние не позволяло использовать для трелёвки древесины мини-трактор. На основании информации, полученной при обследовании участка, было решено осуществлять трелёвку сортиментов по схеме, представленной на рисунке 1.

Складирование сортиментов для погрузки на автотранспорт планировалось осуществлять вдоль лесных и грунтовых дорог (фото 5). Проведённые после проведения проходной рубки расчёты показали, что её интенсивность составила 12 % от исходного запаса древостоя. Не отмечено повреждения верхнего горизонта почвы и полностью сохранён напочвенный покров (фото 6). В то же время произошло улучшение санитарного состояния древостоя после удаления сухостойных и усыхающих деревьев. Относительная полнота снизилась

на 0,1, произошло увеличение среднего диаметра и средней высоты оставшихся после рубки деревьев (таблица 3). В процессе проведения лесозаготовительных работ проводились хронометрические наблюдения, при которых определялось время, затраченное одним человеком на проведение всего комплекса лесозаготовительных работ (валка, раскряжёвка, погрузка, трелёвка, штабелёвка, складирование порубочных остатков). Расстояние трелёвки составляло от 30 до 50 м. Рейсовая нагрузка на мини-трактор была от 0,6 до 0,8 м³. Экспериментально установлено, что при таких условиях за 6 ч рабочего времени реально заготавливалось 3,0—3,5 м³ древесины. При этом 58 % этого времени (3 ч 30 мин) приходится на операции, связанные с работой мини-трактора (таблица 4). Из них наиболее продолжительной является загрузка сортиментов на прицепное устройство (57 %, или около 2 ч).

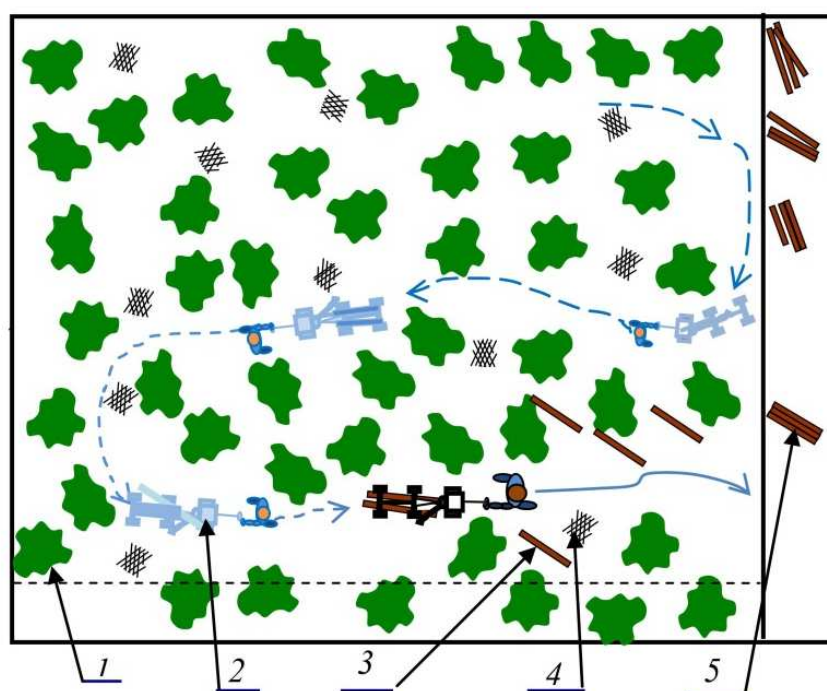


Рисунок 1. Трелёвка челночными ходами с загрузкой прицепного устройства при передвижении по всему маршруту: 1 — растущие деревья; 2 — малогабаритный трактор и маршрут его перемещения; 3 — заготовленные сортименты; 4 — порубочные остатки; 5 — пакеты

Figure 1. Shuttle-type skidding when the trailer is loaded when moving along the entire track: 1 — growing trees; 2 — a small-sized tractor and the route of its movement; 3 — harvested assortment; 4 — felling residue; 5 - packages



Фото 5. Штабелька сортиментов вдоль лесной дороги

Photo 5. Stockpiling of logs along the forest road



Фото 6. Состояние напочвенного покрова после неоднократного прохода мини-трактора с полной загрузкой

Foto 6. Ground vegetation state after severance cutting using a mini-tractor for forest skidding

Таблица 3. Таксационная характеристика древостоя до и после проходной рубки

Table 3. Taxation characteristics of the forest stand before and after severance cutting

Таксационные характеристики	До рубки	После рубки
Состав	9С1Б	9С1Б
Средняя высота, м	25	27
Средний диаметр, см	24	26
Относительная полнота	0,95	0,85
Возраст, лет	85	85
Запас, м ³ /га	364	319
Подрост:		
состав	6Е4С	6Е4С
высота (ель), м	2,0	2,0
высота (сосна), м	0,2	0,2
возраст (ель), лет	35	35
возраст (сосна), лет	3	3
количество, тыс. экз./га	0,5	0,5

Таблица 4. Затраты времени по операциям на формирование и транспортировку одного транспортного пакета

Table 4. Timing of formation and transportation of one transport package

Длительность операций, мин. доля от затраченного времени, %						Итого
Выбор и валка деревьев	Раскряжёвка деревьев и обрубка ветвей	Сбор порубочных остатков	Трелёвка			
			погрузка сортиментов	трелёвка и холостой ход	штабелёвка	
$\frac{2 \pm 0,7}{5,5}$	$\frac{6 \pm 1,3}{16,7}$	$\frac{7 \pm 1,3}{19,4}$	$\frac{12 \pm 1,2}{33,3}$	$\frac{5 \pm 0,7}{13,9}$	$\frac{4 \pm 0,6}{11,2}$	$\frac{36 \pm 5,5}{100}$

Следующим объектом являлись культуры сосны, расположенные на территории Свердловского лесничества (Черноусовское участковое лесничество), в кв. 30, выд. 14. Территория закреплена за арендным предприятием ООО «ЖелДорПуть». Участок имеет форму прямоугольного треугольника, длинная сторона которого с восточной стороны примыкает к лесной дороге. Рельеф ровный, с небольшим понижением в северо-западной части лесосеки. С северной стороны лесосека ограничена грунтовой дорогой. Ряды культур

сосны не везде просматриваются. Особенно чётко они обозначены в восточной части лесосеки на узком участке (1—2 ряда), прилегающем к лесной дороге (фото 7).

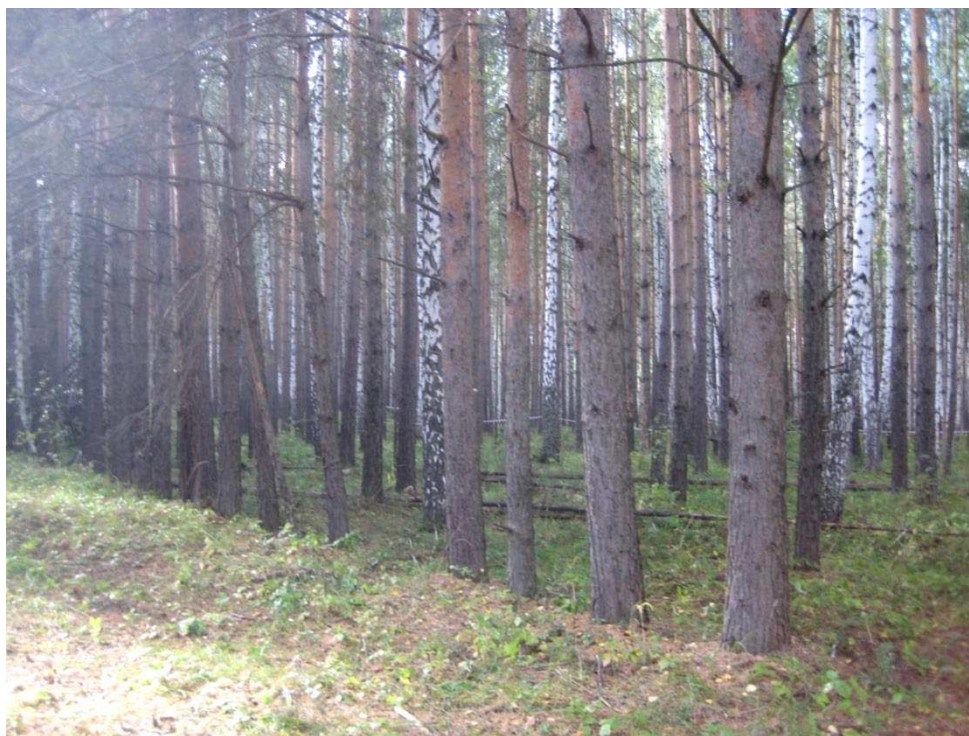


Фото 7. Лесные культуры сосны на границе с лесной дорогой

Photo 7. Forest plantation of pine on the border with the forest road

Здесь же произрастают наиболее крупномерные деревья (диаметр на высоте груди у отдельных деревьев достигал около 50 см), имеющие низко опущенную и хорошо развитую крону. Внутри лесосеки зафиксировано значительное количество сухостойных и ветровальных деревьев, соответственно 20 м³/га и 10 м³/га, что отразилось на снижении полноты и запаса древостоя в этой части участка (фото 8). Стволы здоровых деревьев сосны и берёзы хорошо очищены от ветвей и имеют высоко поднятую крону. Длина заготавливаемых сортиментов предполагалась от 5,5 до 6,5 м. На участке запроектирована проходная рубка интенсивностью 15 % от исходного запаса древостоя. На основании текущих таксационных характеристик, наличия значительного объёма сухостойных и ветровальных деревьев сосны, специализации предприятия на изготовление столбов ЛЭП и железнодорожных шпал, отсутствия потребности в сосновой дровяной древесине, а также с целью сохранения лесорастительной среды и древостоя приняты следующие технологические решения:

- Сосредоточить основные работы по заготовке деловой древесины в восточной части лесосеки.
- Склаживать заготовленные сортименты в восточной части лесосеки вдоль лесной дороги.
- Производить трелёвку крупных сортиментов по подкладочным деревьям.

- Под погрузочную площадку использовать прогалину, прилегающую к лесной дороге в восточной части лесосеки.
- В центральной части лесосеки производить вырубку сухостойных деревьев и уборку валежа с последующим их сжиганием на открытых участках (окнах), размеры которых были бы достаточные, чтобы исключить ожог у здоровых деревьев.



Фото 8. Участок лесных культур сосны, отведённый в проходную рубку

Photo 8. The site of pine forest plantation for severance cutting

Для реализации первого и второго пунктов подошла схема трелёвки древесины параллельно кромке леса (рисунок 2). Трелёвка крупномерных сортиментов осуществлялась по подкладочным деревьям. Для этого из ряда лесных культур вырубались сухостойные и тонкомерные деревья диаметром 10—12 см, которые укладывались через 1,5—2 м примерно перпендикулярно по направлению трелёвки (фото 9). На них происходила валка крупномерных экземпляров деревьев. После обрубки ветвей и раскряжёвки хлыстов сортименты с помощью троса подтягивались к месту их складирования (фото 10). За счёт уменьшения площади соприкосновения с поверхностью создавалась возможность трелевать крупные сортименты, превышающие массу мини-трактора, и предотвратить образование

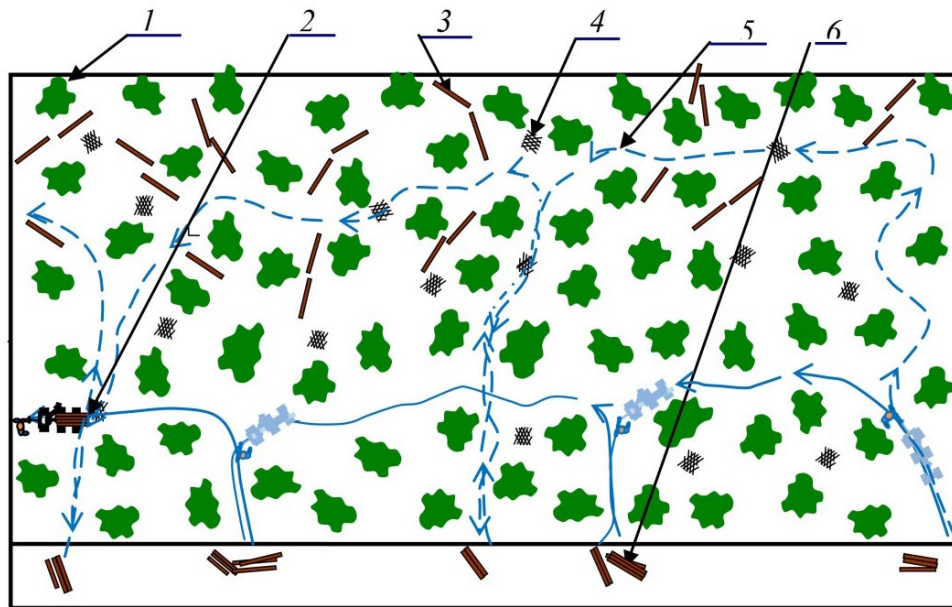


Рисунок 2. Трелёвка леса ходами параллельными кромке древостоя: 1 — растущие деревья; 2 — малогабаритный трактор и маршрут его перемещения при подборе сортиментов с ближней ленты; 3 — заготовленные сортименты; 4 — порубочные остатки; 5 — маршруты перемещения малогабаритного трактора при подборе сортиментов со второй от кромки древостоя ленты; 6 — пакеты сортиментов в зоне складирования

Figure 2. Forest skidding with moves parallel to the forest stand border: 1 — growing trees; 2 — a small-sized tractor and the route of its movement when collecting assortment from the nearby swath; 3 — harvested assortment; 4 — felling residue; 5 — routes of movement of a small-sized tractor when collecting assortment from the second swath from the stand edge; 6 - packages of assortment in the storage area

глубоких борозд на поверхности почвы. После завершения трелёвки крупных сортиментов подкладочные деревья раскряжёвывались и на прицепном устройстве трелевались к месту складирования. В центральной части лесосеки, кроме заготовки древесины, проводились работы по уборке тонкомерных сухостойных деревьев и валежа. Для этого выбиралось открытое место и раскряжёванные на произвольные отрезки стволы подтягивались лебёдкой трактора к месту, где происходило их сжигание. После окончания лесосечных работ не произошло снижения средней высоты и диаметра древостоя, сохранилось соотношение древесных пород в его составе, относительная полнота снизилась до 0,85 (таблица 5). Территория участка приведена в надлежащее санитарное состояние (фото 11). При проведении проходной рубки в начальной и конечной стадиях эксперимента фиксировался объём заготовленной древесины при проведении всего комплекса лесозаготовительных работ (валка деревьев, обрубка сучьев, раскряжёвка хлыстов, трелёвка

и штабелёвка сортиментов, сбор порубочных остатков и их сжигание). Дополнительные затраты времени по подготовке трассы для трелёвки крупных сортиментов и переработка (обрубка сучьев, складирование и сжигание) значительного объёма порубочных остатков компенсировались объёмом крупных сортиментов. В результате объём заготовленной ликвидной древесины составил 0,6—0,7 м³/ч, или 3,5—4,0 м³/смену.



Фото 9. Деревья, уложенные перпендикулярно направлению трелёвки

Photo 9. The trees located perpendicular to the direction of the skidding



Фото 10. Трелёвка крупных сортиментов по подкладочным деревьям

Photo 10. Skidding of large logs using dunnage trees

Таблица 5. Таксационные характеристики лесных культур сосны в типе леса сосняк травяной

Table 5. Taxation characteristics of pine forest plantation in a grass pine forest

Таксационные показатели	Таксационные характеристики насаждения	
	до рубки	после рубки
Состав	6С4Б, ед. Ос	6С4Б, ед. Ос
Средняя высота, м	24	24
Средний диаметр, см	23	23
Относительная полнота	1,0	0,85
Возраст, лет	60	60
Запас, м ³ /га	390	330



Фото 11. Состояние насаждения после проходной рубки

Photo 11. The forest stand after severance cutting

Очередной объект исследований также расположен на территории Свердловского лесничества (Черноусовское участковое лесничество), в кв. 30, выд. 14. Участок выровненный, имеет прямоугольную форму 100 × 150 м (1,5 га), длинной стороной ориентирован в направлении С–Ю, а по короткой стороне ограничен лесовозными дорогами. Таким образом, расстояние от середины участка до дорог составляло 50 м. Таксационная

характеристика древостоя представлена в таблице 6. На этом участке находятся подпологовые культуры дуба летнего или дуба черешчатого (*Quercus robur*). Расстояние между рядами 2,0—2,5 м. Высота культур варьирует в пределах от 0,5 до 7,0 м (фото 12). Отдельные экземпляры достигали 9 м. Основной целью мероприятия являлся уход за подпологовыми культурами дуба. Объект является уникальным, т. к. граница ареала естественного произрастания дубовых насаждений проходит на несколько сотен километров южнее. Исходя из особенностей участка, наличия рядов лесных культур и обязательного их сохранения, ограниченной маневренности мини-трактора с прицепным устройством в междурядьях, было принято решение провести проходную рубку с использованием технологии параллельных ходов между двумя лесными дорогами (рисунок 3). В этом случае мини-трактор с прицепным устройством перемещался всё время в направлении вперёд без разворотов внутри древостоя. Дополнительные трудности при проведении проходной рубки на данном участке были связаны со строго направленной валкой деревьев в междурядья вдоль рядов лесных культур (фото 13). Поэтому в первой половине дня осуществлялись валка деревьев, обрезка ветвей, раскряжёвка хлыстов на 6-метровые сортименты и сбор порубочных остатков.

Таблица 6. Таксационная характеристика насаждения с культурами дуба

Table 6. Taxation characteristics of the forest site including oak plantation

Таксационные показатели	Таксационные характеристики древостоя
Тип леса	Сосняк травяной
Состав	7Б3С
Возраст	65
Класс бонитета	I
Средняя высота, м	24
Средний диаметр, см	24
Относительная полнота	0,9
Запас, м ³ /га	315
Подпологовые культуры дуба: возраст, лет, высота, м	30 2,3
Количество, экз./га	2300



Фото 12. Насаждение с подпологовыми культурами дуба летнего или дуба черешчатого (*Quercus robur*)

Photo 12. Forest stand with cutures of oak (*Quercus robur*) as a subordinate crop

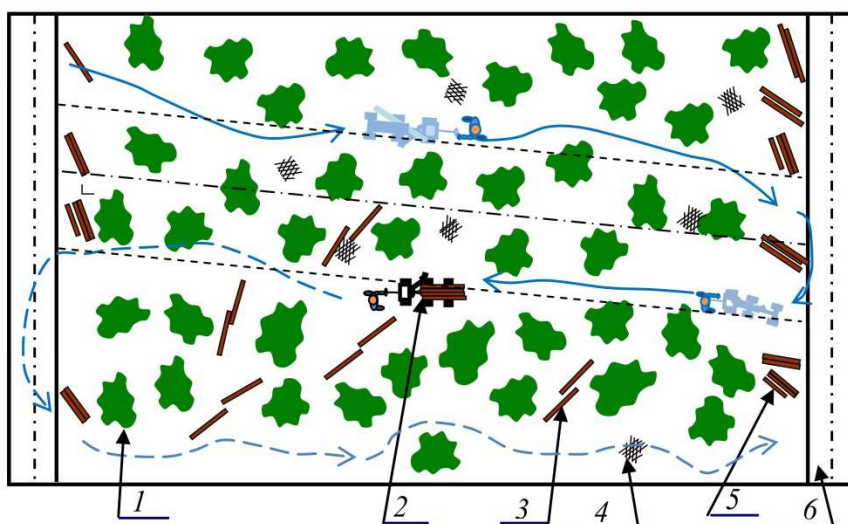


Рисунок 3. Трелёвка леса параллельными ходами между двумя волоками: 1 — растущие деревья; 2 — малогабаритный трактор и маршрут его перемещения; 3 — заготовленные сортименты; 4 — порубочные остатки; 5 — пакеты сортиментов; 6 — пасечный волок

Figure 3. Wood skidding by parallel passages between two tracks: 1 — growing trees; 2 — a small—sized tractor and the route of its movement; 3 — harvested assortment; 4 — felling residue; 5 — packages of assortment; 6 – cutting strip



Фото 13. Трелёвка древесины между рядами культур дуба

Photo 13. Wood skidding between the rows of oak trees

Во второй половине дня производили трелёвку сортиментов на прицепном устройстве за пределы лесосеки к месту погрузки на автотранспорт. По мнению непосредственного участника эксперимента, смена операций в течение рабочего дня явилась положительным моментом с точки зрения техники безопасности. В итоге отработана технология лесозаготовки в насаждении с подпологовыми лесными культурами. Относительная полнота древостоя снижена до 0,7, полностью сохранены напочвенный покров и верхний горизонт почвы, улучшены условия лесорастительной среды подпологовых культур дуба (фото 14). Ранее было установлено, что при использовании мини-трактора на трелёвке леса 57 % времени занимает погрузка сортиментов на прицепное устройство (см. таблицу 4). Это связано с перемещением рабочего для чокеровки сортиментов и включением и выключением лебёдки. Такие перемещения от мини-трактора и обратно могут происходить неоднократно в случае зацепа сортимента за препятствие. Применение дистанционного управления лебёдкой показало, что время операции по загрузке сортиментов сокращается в 1,7 раза и составляет 7 мин вместо 12 мин. Общие затраты времени на проведение всего технологического цикла сокращаются на 19,4 %. В результате реально при проведении всего цикла лесозаготовительных работ одним человеком за 6 ч возможно заготовить около 4 м³, вместо 3,0—3,5 м³. Таким образом, первая часть лесозаготовительных работ, связанных с валкой деревьев, обрезкой ветвей, раскряжёвкой хлыстов и сбором порубочных остатков, по продолжительности уравнилась с работами, связанными с трелёвкой заготовленной древесины, соответственно 15 мин и 16 мин (см. таблицу 4). Раздельное выполнение этих

операций двумя рабочими обеспечивает реальную выработку на бригаду в размере $7,5 \text{ м}^3/\text{смену}$. По отношению к варианту с одним рабочим объём заготовленной древесины снижается на $0,3 \text{ м}^3$ и составляет $3,8 \text{ м}^3/\text{смену}$, но при этом увеличивается пройденная рубкой площадь.



Фото 14. Состояние насаждения после проходной рубки

Photo 14. The forest stand after severance cutting

Последний участок проходной опытно-производственной рубки с использованием мини-трактора на трелёвке сортиментов проводился на территории Уральского учебно-опытного лесхоза Уральского государственного лесотехнического университета (УГЛТУ) (Билимбаевское лесничество, участок Северский, кв. 37, выд. 16). Лесосека расположена на небольшом склоне, примыкает к пойме реки Северка и имеет вытянутую форму. Её ширина составляет около 60 м. Почти по середине участка проходит дорога шириной 5 м, ведущая к памятнику природы регионального значения «Соколиный камень». На лесосеке зарегистрировано $40 \text{ м}^3/\text{га}$ сухостойных деревьев, что составляет около 9 % от общего запаса древостоя, и 8 тыс. экз./га жизнеспособного елового подроста (фото 15). Сухостойные и зависшие деревья представляют серьёзную опасность для экскурсий. Отмечены случаи падения деревьев на дорогу. Таким образом, первоочередная задача заключалась в создании условий для безопасного прохода по туристической тропе. Форма и размеры лесосеки, наличие широкой дороги, дистанционное управления лебёдкой позволили испытать мини-трактор в качестве самоходной лебёдки по схеме, представленной на рисунке 4. Такая технология не предусматривает использования прицепного устройства и перемещения

мини-трактора по площади лесосеки. Валка деревьев осуществлялась вершиной в сторону дороги. После этого происходила обрезка ветвей. Хлысты либо раскряжёвывались на 6-метровые сортименты или целиком подтаскивались лебёдкой к дороге, где происходила дальнейшая их обработка. Мини-трактор устанавливался перпендикулярно дороге. Рабочий разматывал буксировочный трос, чокеровал сортимент или хлыст и после дистанционного включения лебёдки, которое подтверждалось световым и звуковым сигналами, следовал за лесоматериалом. При возникновении ситуации, препятствующей выполнению этой операции, лебёдка с помощью джойстика останавливалась, причина устранялась, после чего процесс возобновлялся. Вся стрелёванная древесина располагалась вдоль дороги (фото 16), где осуществлялась её механизированная погрузка на автотранспорт. Ещё одним положительным моментом при применении этой технологии стало максимальное сохранение подроста и верхнего горизонта почвы (фото 17). В результате проведена проходная рубка интенсивностью 28 % от исходного запаса древостоя (таблица 7). После неё произошло увеличение среднего диаметра деревьев, а относительная полнота снизилась до 0,7. Улучшено санитарное состояние древостоя: убраны все сухостойные, повреждённые и зависшие деревья. Отмечены единичные случаи гибели елового подроста.



Фото 15. Состояние насаждения до проходной рубки

Photo 15. The forest stand before severance cutting

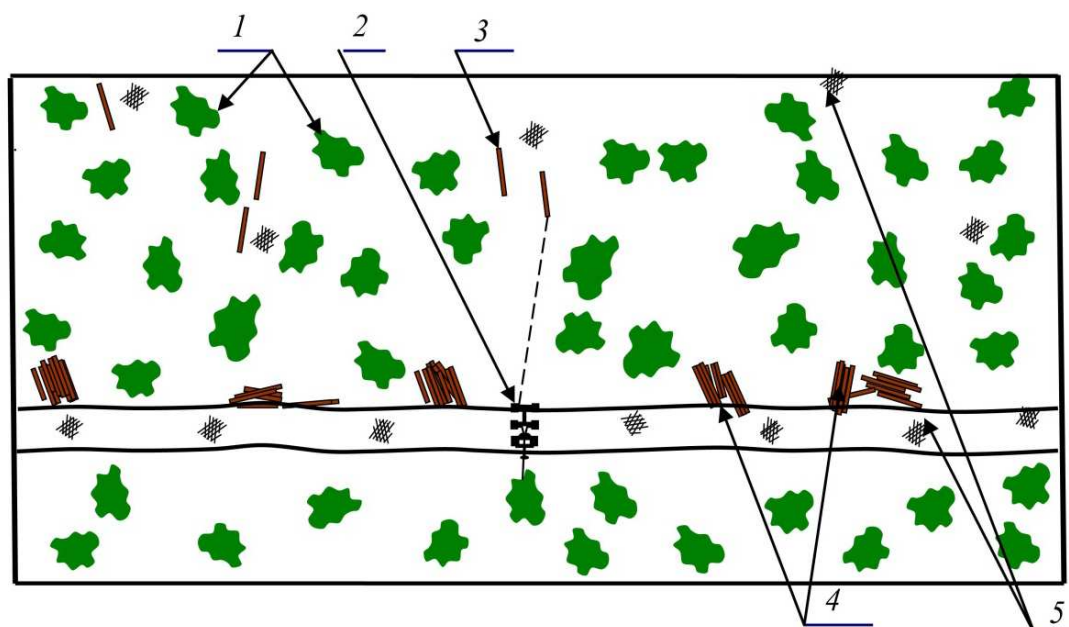


Рисунок 4. Использование мини-трактора в качестве самоходной лебёдки: 1 — деревья; 2 — малогабаритный трактор; 3 — заготовленные сортименты; 4 — пакеты сортиментов; 5 — порубочные остатки

Figure 4. Using a min-tractor as a self-propelled winch: 1 — trees; 2 — a small-sized tractor; 3 — harvested assortment; 4 — packages of assortment; 5 - felling residue

Таблица 7. Таксационная характеристика древостоя

Table 7. Taxation characteristics of the forest stand

Таксационные показатели	Таксационные характеристики древостоя	
	до рубки	после рубки
Состав	9С1Б, ед. Лц, Е	9С1Б, ед. Лц, Е
Возраст, лет	75	75
Средняя высота, м	23	23
Средний диаметр, см	22	24
Полнота относительная	1,0	0,7
Запас, м ³ /га	460	320
Подрост:		
состав	10Е	10Е
возраст, лет	25	25
высота, м	1,0	1,0
количество, тыс. экз./га	8,0	8,0



Фото 16. Стрелёванные вдоль дороги сортименты

Photo 16. Skidded logs along the road



Фото 17. Состояние насаждения после проходной рубки

Photo 17. The forest stand before severance cutting

4. Обсуждение и заключение

Мини-трактор МТР-1 с прицепным устройством хорошо зарекомендовал себя для трелёвки сортиментов на расстоянии 50 м. Его габариты при рубках ухода за лесом позволяют производить трелёвку заготовленной древесины без разрубки технологических коридоров, а низкое удельное давление на единицу поверхности ($0,15 \text{ кг/см}^2$) обеспечивает сохранение напочвенного покрова и верхнего горизонта почвы. В результате трёхлетней работы по испытанию мини-трактора на трелёвке леса в производственных условиях опробован и предложен ряд технологических схем. Выбор конкретной схемы зависит от конфигурации лесосеки, её рельефа, наличия и состояния дорожно-тропиночной сети и прогалин, пространственного расположения деревьев. Установлено, что при проведении всего комплекса лесозаготовительных работ — от валки деревьев, их раскряжёвки, трелёвки и до уборки порубочных остатков — один человек в состоянии заготовить $3,0\text{—}3,5 \text{ м}^3/\text{смену}$. Применение дистанционного управления лебёдкой позволяет увеличить этот объём до $4 \text{ м}^3/\text{смену}$. Кроме этого, появляются перспективы разделить и синхронизировать по времени операции, связанные с проведением лесозаготовительных работ бригадой в составе двух человек. Один занимается непосредственно валкой деревьев и дальнейшей обработкой хлыстов, другой — трелёвкой раскряжёванной древесины и её штабелёвкой. В этом случае производительность такой бригады возрастает до $7,5 \text{ м}^3/\text{смену}$ и сокращается время освоения лесосеки. В процессе опытно-производственных работ успешно опробован способ трелёвки крупных сортиментов по подкладочным деревьям. Это позволяет обойтись без привлечения более мощной лесозаготовительной техники и избежать существенного повреждения верхнего горизонта почвы. Предполагается, что подобная техника и прилагаемые к ней технологические схемы трелёвки древесины будут полезны, прежде всего, администрациям муниципальных образований и лесохозяйственным предприятиям, осуществляющим свою деятельность в городских лесах, лесах вокруг городских и сельских поселений и других насаждениях, относящихся к категории защитных.

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FUWW-2023-0010 и FEUGWW-2023-0002.

Список литературы

1. Об утверждении Правил ухода за лесами / Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации: приказ от 30 июля 2020 года № 534. 206 с.
2. Антонов И. О. Повышение качественной продуктивности насаждений — задача интенсивного лесного хозяйства // Известия вузов. Лесной журнал. 2017. № 1 (355). С. 86—94. DOI: 10.17238.
3. Мясичев Д. Г. Синтез структуры лесохозяйственного механизированного комплекса на базе малогабаритного мобильного силового модуля // Лесотехнический журнал. 2017. Т. 7. № 1 (25). С. 196—204. DOI: 12737/25211.
4. Theoretical Studies of Dynamic Soil Compaction by Wheeled Forestry Machines / I. Grigorev, O. Kunickaya, A. Burgonutdinov [et al.] // Diagnostyka. 2020. Vol. 21, no. 2. P. 3—13. DOI: 10.29354/diag/127650.

5. Skidding operations in Thinning and Shelterwood Cut of Mixed Stands — Work Productivity, Energy Inputs and Emissions / D. Vusić, M. Šušnjar, E. Marchi [et al.] // *Ecological Engineering*. 2013. Vol. 61, part A. P. 216—223.
6. Семин И. А. Малогабаритные лесозаготовительные машины Скандинавских стран. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1999. 10 с.
7. Developing Management Systems for the Production of Beech Timber / R. Allen, J. Hurst, S. Wiser [et al.] // *New Zealand Journal of Forestry*. 2012. Vol. 57, no. 2. P. 38—44.
8. McEwan A., Brink M., van Zyl S. Guidelines for Difficult Terrain Ground Based Harvesting Operations in South Africa // *ICFR Bulletin*. 2013. No. 02. 149 p.
9. Справочник по технологическим и транспортным машинам лесопромышленных предприятий и техническому сервису / под общ. ред. В. В. Быкова, А. Ю. Тесовского. М.: МГУЛ, 2000. 531 с.
10. Modernization of Mini-tractor for Wood Skidding / N. Terinov, V. Toybich, E. Gertz [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 875, iss. 1, no. 12086. DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012086.

References

1. About Acceptance of the Rules of the Forest Stands Care. Ministerstvo prirodny`x resursov i e`kologii Rossijskoj Federacii: prikaz ot 30 iyulya 2020 goda No. 534. 206 p. (In Russ.)
2. Antonov O. I. Qualitative Productivization of Forest Stands is the Goal of Intensive Forestry. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal*, 2017, no. 1, pp. 86—94. doi: 10.17238/issn0536-1036.2017.1.86. (In Russ.)
3. Myasishchev D. G. Synthesis of Structure of Forest Mechanized Complex Based on a Compact Mobile Power Module. *Lesotekhnicheskij zhurnal*, 2017, vol. 7, no. 1 (25), pp. 196—204. doi: 12737/25211. (In Russ.)
4. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Ivanov V., Shuvalova S., Shvetsova V., Stepanishcheva M., Tikhonov E. Theoretical Studies of Dynamic Soil Compaction by Wheeled Forestry Machines. *Diagnostyka*, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 3—13. doi: 10.29354/diag/127650.
5. Vusić D., Šušnjar M., Marchi E., Spina R., Zečić T., Picchio R. Skidding operations in Thinning and Shelterwood Cut of Mixed Stands — Work Productivity, Energy Inputs and Emissions. *Ecological Engineering*, 2013, vol. 61, part A, pp. 216—223.
6. Semin I. A. *Small-Sized Logging Machines of the Scandinavian Countries*. Moscow, VNIPIE`Ilesprom, 1999. 10 p. (In Russ.)
7. Allen R., Hurst J., Wiser S., Easdale T. Developing Management Systems for the Production of Beech Timber. *New Zealand Journal of Forestry*, 2012, vol. 57, no. 2, pp. 38—44.
8. McEwan A., Brink M., van Zyl S. Guidelines for Difficult Terrain Ground Based Harvesting Operations in South Africa. *ICFR Bulletin*, 2013, no. 02, 149 p.
9. *Technological and Transport Machines. Handbook of Wood Enterprises and Technical Service*. Under the general editorship V. V. Bykov, A. Y. Tesovsky. Moscow, MGYL, 2000. 531 p. (In Russ.)
10. Terinov N., Toybich V., Gertz E., Mekhrentsev A., Azarenok V., Kazantsev P. Modernization of Mini-tractor for Wood Skidding. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 875, iss. 1, no. 12086. doi: 10.1088/1755-1315/875/1/012086. (In Russ.)

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7103

УДК 630*378.33

Статья

Экспериментальное определение коэффициента полндревесности усовершенствованной плоской сплочной единицы

Васильев Владимир Викторович

кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I (Российская Федерация),
vasiliev.vladimir87@mail.ru

Получена: 4 мая 2023 / Принята: 19 октября 2023 / Опубликовано: 24 октября 2023

Аннотация: Эффективное использование пропускной способности сплавного хода зависит от ряда факторов, но основным моментом является организация сплава круглых лесоматериалов в сплочных единицах, имеющих высокие транспортно-эксплуатационные показатели. Разработана плоская сплочная единица, которая характеризуется малой осадкой, высокой жёсткостью и высоким коэффициентом полндревесности. Для оценки степени использования разработанной плоской сплочной единицей пропускной способности сплавного хода необходимо определить её коэффициент полндревесности. Определение коэффициента полндревесности плоской сплочной единицы в зависимости от диаметра в верхнем отрезе круглых лесоматериалов, из которых собираются ряды сплочной единицы, реализовано экспериментальным путём. Для рационального выполнения экспериментальных работ была построена функциональная схема проведения эксперимента, на основании которой сформировали матрицу планирования опытов, учитывающую все факторы, влияющие на эксперимент. Опыты проводились на моделях усовершенствованной плоской сплочной единицы, а в последующем полученные экспериментальные и расчётные данные для моделей переводились пропорционально на плоские сплочные единицы натуральных размеров. На основании полученных расчётных данных в отношении усовершенствованной плоской сплочной единицы натуральных размеров был построен график зависимости её коэффициента полндревесности от диаметра круглых лесоматериалов в верхнем отрезе. Построенный график показывает, что при увеличении диаметра круглых лесоматериалов в верхнем отрезе, из которых собираются ряды усовершенствованной плоской сплочной единицы, коэффициент

полнодревесности уменьшается. В свою очередь, наибольшая интенсивность изменения коэффициента полнодревесности присутствует при изменении диаметра круглых лесоматериалов в верхнем отрезе от 10 до 30 см. Так как плоские сплоточные единицы изготавливаются из круглых лесоматериалов с диаметром в верхнем отрезе 10—40 см, а при данном диаметре лесоматериалов усовершенствованная плоская сплоточная единица имеет наибольший коэффициент полнодревесности, то выполнение сплава лесоматериалов в данной сплоточной единице будет, безусловно, обеспечивать высокую степень использования пропускной способности сплавного хода и способствовать увеличению объёмов поставки древесины потребителям водным транспортом.

Ключевые слова: сплоточная единица плоская; лесоматериалы круглые; поперечные прокладки

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7103

Article

Experimental determination of the stacked volume ratio of an improved flat-flow unit

Vladimir Vasiliev

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great (Russian Federation),
vasiliev.vladimir87@mail.ru*

Received: 4 May 2023 / Accepted: 19 October 2023 / Published: 24 October 2023

Abstract: The effective use of the floating stroke carrying capacity depends on a number of factors, but the main one is high transport and operational indicators of round timber floating in floating units. A flat flow unit has been developed, which is characterized by low draft, high rigidity and a high stacked volume ratio. To assess the efficiency of the developed flat-flow unit, it is necessary to determine its stacked volume ratio. The authors determined experimentally the stacked volume ratio of a flat flow unit depending on the diameter in the upper segment of round timber from which the rows of the flat flow unit were assembled. A functional scheme of the experiment was constructed and a matrix of experiment planning was formed, taking into account all factors affecting the experiment. The experiments were carried out on models of an improved flat-flow unit, and subsequently the experimental and calculated data obtained for the models were transferred proportionally to flat-flow units of natural sizes. Based on the calculated data obtained with respect to the improved flat flow unit of natural dimensions a graph of the dependence of its stacked volume ratio on the diameter of round timber in the upper segment was constructed. The constructed graph shows that with an increase in the diameter of round timber in the upper segment, from which the rows of the improved flat flow unit are assembled, the stacked volume ratio decreases. In return, the stacked volume ratio changes dramatically when the diameter of round timber in the upper segment changes from 10 to 30 cm. Since flat flow units are made of round timber with a diameter in the upper segment of 10–40 cm, and with a given diameter of timber, the improved flat flow unit has the highest stacked volume ratio. The performance of timber floating by using this flat flow unit will certainly provide high efficiency of floating stroke

carrying capacity and contribute to increased volume of wood supply to consumers by water transport.

Keywords: flat flow unit; round timber; transverse gaskets

1. Введение

Водный транспорт является наиболее экономически выгодным транспортом лесоматериалов, который использует естественные водные пути [1—11] и кинетическую энергию потока воды. При этом данный вид транспорта имеет ряд недостатков, связанных с сезонностью его применения и ограничением сплава на малых и средних реках. Сезонность применения водного транспорта обуславливается закрытием навигации при ледоставе, поэтому транспортировка лесоматериалов реализуется только при открытии навигации. Ограничение сплава лесоматериалов на малых и средних реках происходит из-за того, что данные реки имеют лимитирующие габариты сплавного хода, не позволяющие выполнять сплав лесоматериалов в сплоточных единицах и плотках, которые имеют большую осадку. При выполнении сплава лесоматериалов на малых и средних реках наиболее целесообразно применять микропучки или плоские сплоточные единицы, но, как показывает практика [1—5], [11—16], сплав лесоматериалов по рекам с лимитирующими габаритами сплавного хода следует осуществлять в плоских сплоточных единицах, которые в большей степени приспособлены к сложным условиям сплава. Известные плоские сплоточные единицы [1—2], [5], [11—16], в т. ч. те, которые прошли полноценные испытания в Северодвинском бассейне [13], [16], показали хорошие результаты при своей эксплуатации, но при этом были выявлены недостатки, не позволяющие массово перейти на сплав лесоматериалов в плоских сплоточных единицах. К данным недостаткам относятся [17]: сложность конструкции, требующей большого количества сплоточного такелажа; сложность изготовления плоских сплоточных единиц, требующих больших временных и трудовых затрат; невысокий среднестатистический коэффициент полндревесности среди типовых конструкций плоских сплоточных единиц. При этом последний недостаток не даёт возможность максимально использовать пропускную способность сплавного хода.

Учитывая выявленные недостатки известных сплоточных единиц, была разработана система плоской сплоточной единицы [18—19] с высоким коэффициентом полндревесности, которая имеет простую конструкцию и изготавливается на грузовой платформе с малыми трудовыми затратами [20]. Для оценки эффективности разработанной конструкции плоской сплоточной единицы при проведении сплава требуется проведение экспериментального исследования по установлению её коэффициента полндревесности.

Цель работы — экспериментально определить коэффициент полндревесности усовершенствованной плоской сплоточной единицы в зависимости от применяемого диаметра круглых лесоматериалов в верхнем отрезе.

2. Материалы и методы

Разработанная конструкция плоской сплоточной единицы с повышенным коэффициентом полндревесности (патент на изобретение РФ № 2777676) [19], которая дополнительно была подвергнута ряду усовершенствований [18], является объектом исследования.

Коэффициент полндревесности усовершенствованной плоской сплоточной единицы является одним из основополагающих при расчёте объёма древесины в сплоточной единице и её осадки. Данные показатели — это основные аргументы при обосновании степени использования пропускной способности сплавного хода. Следовательно, установление коэффициента полндревесности $K_{ППСЕ}$ плоской сплоточной единицы экспериментальным путём считается важнейшей задачей перед внедрением её в практику сплава лесоматериалов по рекам с малыми глубинами.

Рассматривая подробно процесс проведения экспериментального исследования по обоснованию коэффициента полндревесности плоской сплоточной единицы, можно сделать однозначный вывод, что на проведение всей исследовательской работы будут влиять количественные и качественные факторы. С учётом основных правил по планированию эксперимента в технологических исследованиях [21—31] была построена схема проведения эксперимента. Данная схема изображена на рисунке 1.

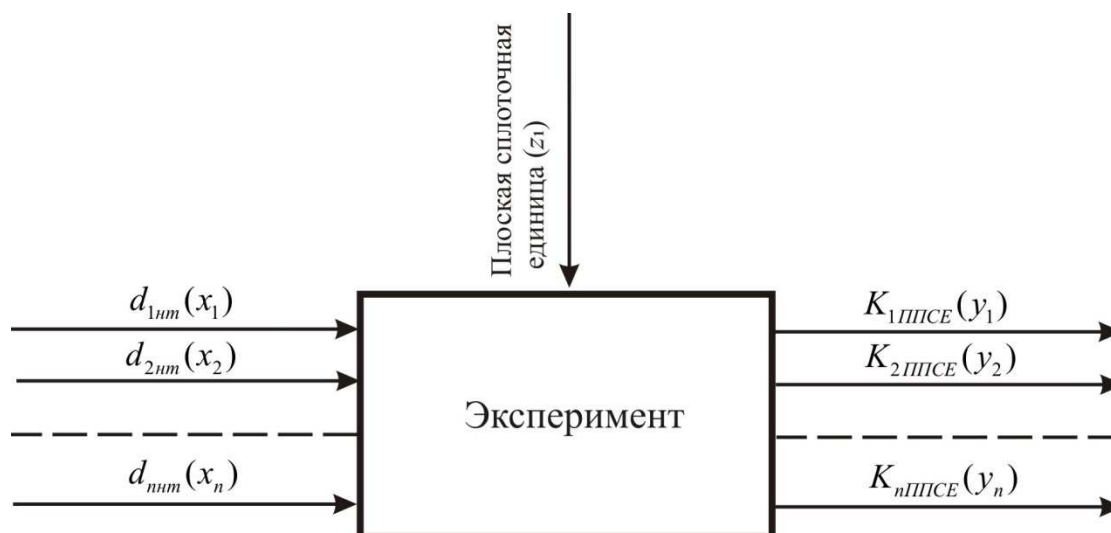


Рисунок 1. Функциональная схема проведения эксперимента

Figure 1. Functional scheme of the experiment

В соответствии с изображённой на рисунке 1 схемой проведения эксперимента присутствует один качественный фактор, именуемый конструкция № 1 (z_1), т. е. это конструкция усовершенствованной плоской сплоточной единицы (патент на изобретение РФ № 2777676). Также имеются в наличии количественные факторы — это диаметры круглых лесоматериалов в верхнем отрезе, из которых собираются ряды плоских сплоточных единиц.

Они изменяются от d_{1nm} до d_{nm} . Параметром отклика является коэффициент полндревесности плоской сплотовой единицы в зависимости от диаметра круглых лесоматериалов в верхнем отрезе, из которых собираются ряды сплотовой единицы.

Для наиболее рационального выполнения экспериментальных исследований строится матрица планирования опытов на основании схемы, изображённой на рисунке 1. При этом построение матрицы планирования опытов реализуется с учётом соблюдения определённых условий. Первое условие — диаметры круглых лесоматериалов в верхнем отрезе являются количественными факторами. Данные диаметры являются нулевыми уровнями, которые изменяются от 10 до 70 см, с шагом 10 см. Второе условие — все диаметры круглых лесоматериалов в верхнем отрезе для каждого количественного фактора при изготовлении моделей должны обязательно соответствовать нулевому уровню. Третье условие — это требование к заготавливаемым круглым лесоматериалам, которые используются при изготовлении плоской сплотовой единицы. Порода древесины заготавливаемых круглых лесоматериалов не регламентируется, их средняя сбежистость должна быть не более 1 см на 1 м при минимально возможном процентном показателе кривизны лесоматериалов. В соответствии с данными условиями в отношении качественного фактора будут выполняться семь опытов. На основании этого была построена матрица планирования опытов, которая представлена в таблице 1.

Таблица 1. Матрица планирования опытов

Table 1. Experiment planning matrix

Факторы	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
	d_{1nm}	d_{2nm}	d_{3nm}	d_{4nm}	d_{5nm}	d_{6nm}	d_{7nm}
Нулевой уровень	10	20	30	40	50	60	70
Номер опыта:	—	—	—	—	—	—	—
1	+	+	+	+	+	+	+

На основании матрицы планирования опытов, приведённой в таблице 1, выполняются дальнейшие экспериментальные работы по установлению коэффициента полндревесности $K_{нПДСЕ}$ плоской сплотовой единицы для каждого количественного фактора. При этом выполнение опытов осуществлялось по следующей методике.

Выполнение всех опытов в отношении плоской сплотовой единицы (патент на изобретение РФ № 2777676) предусматривает изготовление семи сплотовых единиц натуральных размеров. При этом изготовление плоских сплотовых единиц требует заготовки круглых лесоматериалов, где особая сложность присутствует при заготовке лесоматериалов, имеющих диаметр в верхнем отрезе 40, 50, 60 и 70 см. Эти факторы несут в себе значительную потребность материальных и трудовых ресурсов, а также большие затраты времени. Отсюда следует, что для уменьшения всех затрат при проведении каждого

опыта и увеличения скорости их реализации наиболее рационально переходить на работу с моделями плоских сплочных единиц. Масштаб моделей плоских сплочных единиц принимается равным 1 : 10. Данный масштаб является наиболее оптимальным, а получаемые экспериментальные данные будут являться объективными и достоверными для дальнейшего использования во всех расчётах.

Например, для второго количественного фактора, согласно принятому масштабу, принимаем длину круглых лесоматериалов в рядах, равную 60 см, а ширину модели следует принимать 40 см. Размеры поперечных прокладок устанавливаются в зависимости от количества круглых лесоматериалов, укладываемых в каждом ряду, и их принятого диаметра. Таким образом, для данного опыта количество круглых лесоматериалов с учётом их сбежистости в первом и третьем рядах составляет $40 \div 2,3 = 17,39 \approx 17$ шт., а во втором и четвёртом — 16 шт. Тогда длина поперечных прокладок равна 39,1 см, а средний диаметр внутренних и наружных поперечных прокладок $d_{срвпп}$ и $d_{срнпп}$ в середине их длин рекомендуется определять соответственно по формулам:

$$d_{срвпп} = k_{кудв} d_{ср}; \quad (1)$$

$$d_{срнпп} = k_{кудн} d_{ср}, \quad (2)$$

где $k_{кудв}$ — коэффициент уменьшения диаметра внутренних поперечных прокладок; $d_{ср}$ — средний диаметр в верхнем отрезе круглых лесоматериалов, используемых в рядах плоской сплочной единицы, см; $k_{кудн}$ — коэффициент уменьшения диаметра наружных поперечных прокладок.

При расчёте $d_{срвпп}$ и $d_{срнпп}$ коэффициенты $k_{кудв}$ и $k_{кудн}$ будут равными значениям, которые устанавливаются экспериментальным путём.

Для данного эксперимента гибкие связи будут представлять собой вязальную проволоку с диаметром 0,4 см. При этом горизонтальные скобы представляют собой металлические стержни с диаметром 0,6 см, а вместо вертикальных скоб используются деревянные рейки, которые крепятся к поперечным прокладкам гвоздями. Модель плоской сплочной единицы изготавливается, согласно патенту на изобретение РФ № 2777676, в специальной установке (фото 1). Реализовав сплотку плоской сплочной единицы, измеряют её среднюю длину $L_{мпсе}$, ширину $B_{мпсе}$ и высоту $H_{мпсе}$, а также рассчитывают объём древесины в сплочной единице $V_{дмпсе}$ с учётом объёма древесины в поперечных прокладках. Для дальнейшего расчёта коэффициента полндревесности данной модели применяется следующая формула:

$$K_{2мпсе} = \frac{V_{дмпсе}}{L_{мпсе} B_{мпсе} H_{мпсе}}. \quad (3)$$

Рассчитываемый коэффициент полндревесности по формуле (3), относящийся ко второму количественному фактору, заносили в таблицу 2.

Проведение опытов для 1-го и 3—8-х количественных факторов выполняется аналогично второму количественному фактору. Показатели коэффициента полндревесности по каждому количественному фактору заносили в таблицу 2.

При проведении данного эксперимента измерение длины выпиленных заготовок лесоматериалов, а также габаритов моделей усовершенствованной плоской сплочной единицы осуществляли рулеткой измерительной металлической (ГОСТ 7502-98). Замер диаметра круглых лесоматериалов и поперечных прокладок выполняли штангенциркулем (ГОСТ 166-89). Выпиливание всех круглых лесоматериалов и поперечных прокладок осуществляли ручной пилой (ГОСТ 26215-84). Также следует отметить, что замер диаметров круглых лесоматериалов и поперечных прокладок в середине их длины выполняли два раза перпендикулярно друг другу, где в последующем устанавливали рабочий диаметр, который применяли в расчётах. При расчёте объёма древесины в каждой модели усовершенствованной плоской сплочной единицы использовалась таблица объёмов круглых лесоматериалов [32].

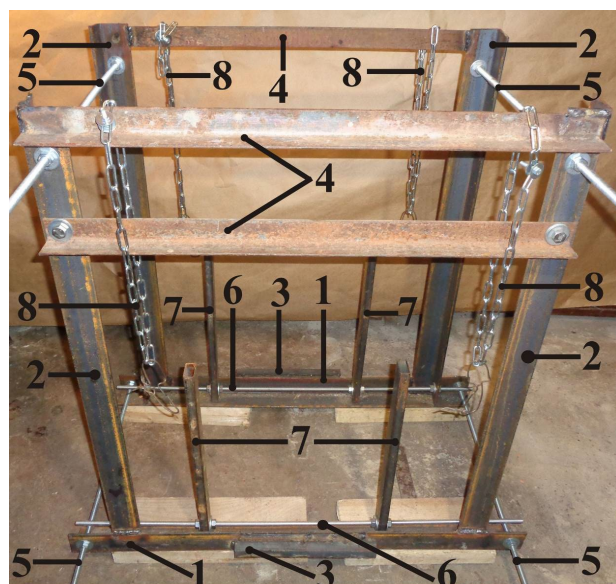


Фото 1. Общий вид установки для экспериментальных исследований: 1 — основание; 2 — вертикальные стойки; 3 — горизонтальные упоры; 4 — горизонтальные верхние переключатели; 5 — продольные регулировочные шпильки; 6 — поперечные регулирующие шпильки; 7 — вертикальные упоры; 8 — цепи

Photo 1. General view of the setup for experimental studies: 1 — base; 2 — vertical racks; 3 — horizontal stops; 4 — horizontal upper crossbars; 5 — longitudinal adjusting studs; 6 — transverse adjusting studs; 7 — vertical stops; 8 — chains

3. Результаты

При изготовлении модели усовершенствованной плоской сплоточной единицы из круглых лесоматериалов, имеющих диаметр в верхнем отрезе 2 см, в установке, представленной на фото 1, использовалось 66 заготовок круглых лесоматериалов длиной 60 см. Количество используемых внутренних и наружных поперечных прокладок — четыре штуки, длина которых составила 39,1 см. Диаметры внутренних и наружных поперечных прокладок в середине длины рассчитывались соответственно:

$$d_{срвпп} = k_{кудв} d_{ср} = 0,85 \times 2,0 = 1,7 \text{ см};$$

$$d_{српп} = k_{кудн} d_{ср} = 1,0 \times 2,0 = 2,0 \text{ см}.$$

Следует отметить, что внутренние и наружные поперечные прокладки выпиливались из заготовок, которые имели минимальную сбежистость, т.е. их объём считался как объём цилиндра.

В установке (фото 1) была собрана модель усовершенствованной плоской сплоточной единицы, которая представлена на фото 2. Данная модель имела среднюю длину 0,64 м, среднюю ширину 0,391 м, среднюю высоту 0,083 м. Фактический объём древесины в модели сплоточной единицы определялся по таблицам объёмов круглых лесоматериалов [32]. На основании данных таблиц был определён объём древесины в модели сплоточной единицы, который составил:

$$V_{\text{ДМПСЕ}} = V_{\text{Дряд}} + V_{\text{Дпр}} = 0,0165 + 0,000423 = 0,016923 \text{ м}^3,$$

где $V_{\text{Дряд}}$ — это объём древесины в рядах, м^3 ; $V_{\text{Дпр}}$ — объём древесины во внутренних и наружных прокладках, м^3 .



Фото 2. Физическая модель плоской сплоточной единицы

Photo 2. A physical model of a flat-flow unit

Полученные габаритные размеры модели и фактический объём древесины в ней по формуле (3) позволили определить коэффициент полндревесности:

$$K_{2ППСЕ} = \frac{V_{ДМПСЕ}}{L_{МПСЕ} B_{МПСЕ} H_{МПСЕ}} = \frac{0,0169}{0,64 \times 0,391 \times 0,083} = \frac{0,0169}{0,0208} = 0,8125 \approx 0,81.$$

Принимая во внимание экспериментальные и расчётные данные, полученные для модели плоской сплоточной единицы, изготовленной из круглых лесоматериалов с диаметром в верхнем отрезе 2 см, был произведён расчёт коэффициента полндревесности для плоской сплоточной единицы с диаметром круглых лесоматериалов в верхнем отрезе 20 см. При этом все полученные данные для модели сплоточной единицы были переведены, согласно масштабу, в требуемый формат. Используя полученные данные, был рассчитан коэффициент полндревесности следующим образом:

$$K_{2ППСЕ} = \frac{V_{ДПСЕ}}{L_{ПСЕ} B_{ПСЕ} H_{ПСЕ}} = \frac{16,923}{6,4 \times 3,91 \times 0,83} = \frac{16,923}{20,7699} = 0,8148 \approx 0,81.$$

Все экспериментальные и расчётные данные, которые были установлены для модели и усовершенствованной плоской сплоточной единицы натуральных размеров, фиксировались в таблице 2.

Таблица 2. Основные данные экспериментального исследования

Table 2. Basic data of the experimental study

Установленный диаметр, см	$\frac{1,0}{10}$	$\frac{2,0}{20}$	$\frac{3,0}{30}$	$\frac{4,0}{40}$	$\frac{5,0}{50}$	$\frac{6,0}{60}$	$\frac{7,0}{70}$
Количество лесоматериалов в рядах, шт.	118	66	46	34	30	22	18
Количество лесоматериалов в первом и третьем рядах, шт.	60	34	24	18	16	12	10
Количество лесоматериалов во втором и четвёртом рядах, шт.	58	32	22	16	14	10	8
Геометрический объём плоской сплоточной единицы, м ³	$\frac{0,0116}{11,575}$	$\frac{0,0208}{20,770}$	$\frac{0,0306}{30,574}$	$\frac{0,0394}{39,440}$	$\frac{0,0539}{53,935}$	$\frac{0,0579}{57,902}$	$\frac{0,0656}{65,613}$
Объём древесины в плоской сплоточной единице, м ³	$\frac{0,0097}{9,694}$	$\frac{0,0169}{16,923}$	$\frac{0,0245}{24,533}$	$\frac{0,0311}{31,106}$	$\frac{0,0421}{42,132}$	$\frac{0,0442}{44,207}$	$\frac{0,0492}{49,151}$
Коэффициент полндревесности плоской сплоточной единицы	$\frac{0,84}{0,84}$	$\frac{0,81}{0,81}$	$\frac{0,80}{0,80}$	$\frac{0,79}{0,79}$	$\frac{0,78}{0,78}$	$\frac{0,76}{0,76}$	$\frac{0,75}{0,75}$

Примечание. Все показатели в числителе относятся к усовершенствованной плоской сплоточной единице, а показатели в знаменателе — к усовершенствованной плоской сплоточной единице натуральных размеров.

Воспользовавшись приведёнными данными в таблице 2, которые относятся к усовершенствованной плоской сплочной единице натуральных размеров, построили график зависимости её коэффициента полндревесности от диаметра круглых лесоматериалов, используемых в рядах сплочной единицы. Данный график представлен на рисунке 2.

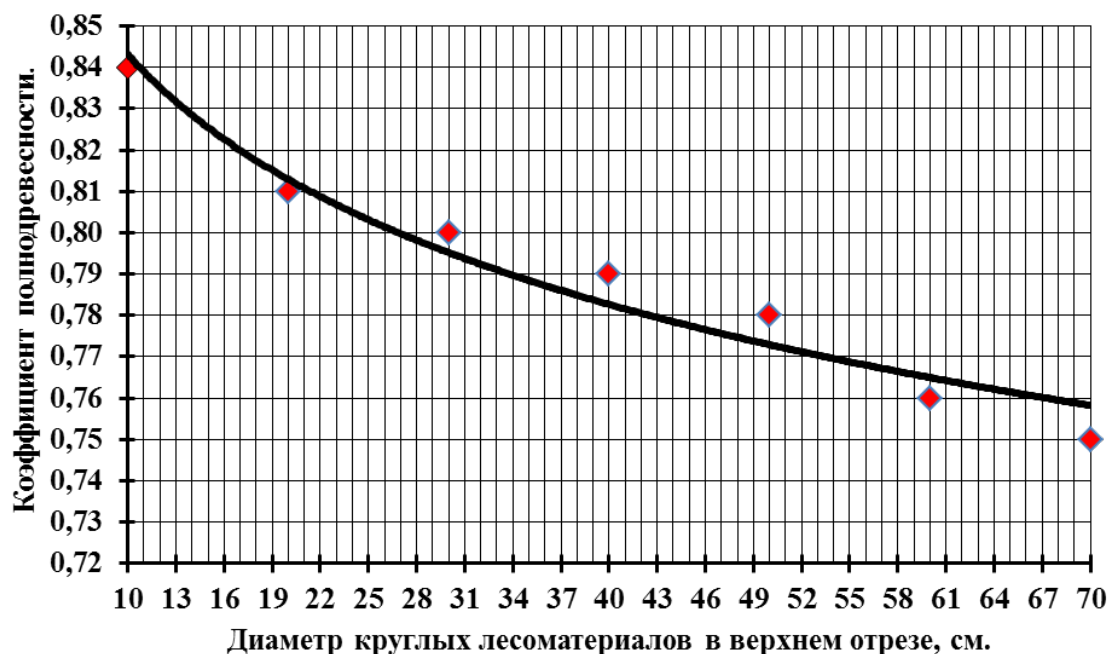


Рисунок 2. График зависимости коэффициента полндревесности усовершенствованной плоской сплочной единицы от диаметра круглых лесоматериалов в верхнем отрезе

Figure 2. Graph of the dependence of the stacked volume ratio of the improved flat flow unit on the diameter of round timber in the upper segment

Анализ графика изменения коэффициента полндревесности усовершенствованной плоской сплочной единицы, представленного на рисунке 2, показывает, что изменение коэффициента полндревесности усовершенствованной плоской сплочной единицы натуральных размеров (патент на изобретение РФ № 2777676) происходит по нелинейной зависимости. Данная зависимость указывает на постоянное уменьшение коэффициента полндревесности при увеличении диаметра круглых лесоматериалов в верхнем отрезе, из которых собираются ряды плоской сплочной единицы. Наибольшая интенсивность изменения коэффициента полндревесности наблюдается при изменении диаметра круглых лесоматериалов в верхнем отрезе от 10 до 30 см. Также необходимо отметить, что данный график приемлем для плоской сплочной единицы, имеющей длину 6 м и ширину 4 м.

4. Обсуждение и заключение

Проведённые экспериментальные исследования моделей усовершенствованной плоской сплottedной единицы позволили установить зависимость коэффициента её полндревесности от диаметра круглых лесоматериалов в верхнем отрезе, из которых собираются ряды сплottedной единицы. При этом получены следующие результаты.

Коэффициент полндревесности плоской сплottedной единицы определяется габаритным объёмом сплottedной единицы и объёмом древесины в данном габаритном объёме. Причём объём древесины в габаритном объёме плоской сплottedной единицы зависит от диаметра круглых лесоматериалов в верхнем отрезе, из которых собираются ряды сплottedной единицы.

При увеличении диаметра круглых лесоматериалов в верхнем отрезе коэффициент полндревесности плоской сплottedной единицы уменьшается. При этом изменение коэффициента полндревесности протекает по нелинейной зависимости. В свою очередь, наиболее интенсивное изменение коэффициента полндревесности наблюдается при изменении диаметра круглых лесоматериалов в верхнем отрезе от 10 до 30 см.

В практических условиях, как правило, наибольшее количество плоских сплottedных единиц изготавливается из круглых лесоматериалов, у которых диаметр в верхнем отрезе изменяется в диапазоне 10—40 см. При этом полученные экспериментальные данные показывают, что усовершенствованная плоская сплottedная единица в данном диапазоне изменения диаметров круглых лесоматериалов имеет наибольший коэффициент полндревесности. Таким образом, выполнение сплава лесоматериалов в усовершенствованной плоской сплottedной единице будет обеспечивать высокую степень использования пропускной способности сплавного хода и способствовать увеличению объёмов поставки древесины потребителям водным транспортом.

Список литературы

1. Васильев В. В., Афоничев Д. Н. Расчёт прочности модернизированной плоской сплottedной единицы // Resources and Technology. 2023. Т. 20, № 1. С. 1—25. DOI: 10.15393/j2.art.2023.6623.
2. Васильев В. В., Афоничев Д. Н. Усовершенствованные системы плотового сплава лесоматериалов: [монография]. Saarbrücken (Германия): Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 284 с.
3. Васильев В. В., Афоничев Д. Н. Использование плоских сплottedных единиц на первоначальном сплаве лесоматериалов // Известия вузов. Лесной журнал. 2022. № 1. С. 128—142. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-128-142.
4. Васильев В. В., Афоничев Д. Н. Обоснование показателя гибкости плота из сплottedных единиц // Известия вузов. Лесной журнал. 2022. № 4. С. 146—155. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-146-155.
5. Васильев В. В. Расчёт транспортно-эксплуатационных показателей усовершенствованной плоской сплottedной единицы // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 4. С. 1—22. DOI: 10.15393/j2.art.2022.6365.

6. *Perfiliev P., Zadrauskaite N., Rybak G.* Study of hydrodynamic resistance of a raft composed of the flat rafting units of various draft // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18 (1.5). Austria, 2018. P. 765—772.
7. Brevet 2882723 FR, Int. CI.8 B 63 B 35/00, 3/08, 7/02. Embarcation modulaire pour le transport des grumes par voie d'eau / Demandeur Roumengas Jonsa Guy; Mandataire SCHMITT. No. 0502132; la date de la demande 03.03.05; la date de parution 21.10.2005, bulletin 06/36. 14 p.
8. Patent 5119529 USA, Int. CI.5 B63B 35/62. Cable hook / Wire Rope Industries Ltd., Pointe-Claire, Canada. No. 703,844; filed: 21.05.1991; date application 09.06.1992.
9. Patent 3971309 USA, Int. CI.2 B63B 27/16. Log bundling apparatus and method of bundling logs / Wilfred Spry Brodie, P. O. Box 175, Gibsons, British Columbia, VON 1VO, Canada. No. 566,904; filed: 10.04.1975; date application 27.07.1976.
10. Patent 3556319 USA, Int. CI. B63b 27/16. Log-bundling apparatus / M. Ray Holden, P. O. Box 716, Ketchikan, Alaska. No. 857,247; filed: 30.06.1969; date application 19.01.1971.
11. *Васильев В. В.* Обоснование параметров транспортно-технологической схемы поставки древесины в плоских сплотовых единицах по принципу плот (линейка) — плот // Resources and Technology. 2021. Т. 18, № 2. С. 48—78. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5603.
12. *Васильев В. В., Афоничев Д. Н.* Обоснование геометрических параметров высокоэффективной плоской сплотовой единицы // Resources and Technology. 2023. Т. 20, № 2. С. 1—19. DOI: 10.15393/j2.art.2023.6763.
13. *Васильев В. В., Барабанов В. А.* Анализ результатов испытания плота из плоских сплотовых единиц в Северодвинском бассейне // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: материалы Междунар. научно-техн. конф. «Техника и технологии — мост в будущее». Воронеж: ВГЛТА, 2014. № 5. Ч. 4 (10-4). С. 67—72.
14. *Васильев В. В.* Особенности формирования осадки плоской сплотовой единицы // Лесотехнический журнал ВГЛТА. 2014. № 1 (13). С. 79—84.
15. *Васильев В. В.* Сплотовая единица для рек с малыми глубинами // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Междунар. научно-техн. конф. «Механика технологических процессов в лесном комплексе». Воронеж: ВГЛТА, 2014. № 2. Ч. 3 (7-3). С. 41—45. DOI: 10.12737/3184.
16. *Митрофанов А. А.* Лесосплав. Новые технологии, научное и техническое обеспечение: [монография]. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. 492 с.
17. *Васильев В. В., Аксенов И. И.* Анализ конструкций перспективных плоских сплотовых единиц // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции — новые технологии и техника нового поколения для АПК: Сб. науч. докл. XX междунар. научно-практич. конф. г. Тамбов, 26—27 сентября 2019 г. Тамбов: Изд-во «Студия печати Галины Золотовой», 2019. С. 188—191.
18. *Васильев В. В.* Усовершенствованная плоская сплотовая единица с повышенным коэффициентом полндревесности // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы междунар. научно-практич. конф. (Россия, Воронеж, 25 ноября 2022 г.). Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ», 2022. С. 37—43.
19. Патент 2777676 Р. Ф., МПК В65В 35/02. Плоская сплотовая единица / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, В. А. Морковин, В. В. Абрамов, Е. В. Поздняков; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический

- университет им. Г. Ф. Морозова» (RU). № 2021140062; заявл. 30.12.2021; опубл. 08.08.2022, Бюл. № 22. 8 с.
20. Патент 213802 Р. Ф., МПК В60Р 3/41. Грузовая платформа / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, А. В. Лощенко; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I» (RU). № 2022123837; заявл. 08.09.2022; опубл. 29.09.2022, Бюл. № 28. 10 с.
21. *Dean A., Voss D., Draguljić D.* Design and analysis of experiments. Springer International Publishing, 2017. 852 p.
22. *Bate S. T., Clark R. A.* The design and statistical analysis of animal experiments. CUP, 2014. 328 p.
23. *Lightbown D.* Designing the user experience of game development tools. A K Peters CRC Press, 2015. 164 p.
24. *Selvamuthu D., Das D.* Introduction to statistical methods, design of experiments and statistical quality control. Springer Singapore, 2018. 445 p.
25. *Gezan S. A.* Statistical methods in biology: design and analysis of experiments and regression. Chapman & Hall/CRC, 2014. 616 p.
26. *Mathews P. G.* Design of experiments with MINITAB. American Society for Quality (ASQ), 2005. 521 p.
27. *Oehlert G. W.* A first course in design and analysis of experiments. Freeman, 2010. 680 p.
28. *Rhinehart R. R.* Applications: modeling, model validation, and enabling design of experiments. Wiley-ASME Press, 2016. 400 p.
29. *Mead R., Gilmour S. G., Mead A.* Statistical principles for the design of experiments: applications to real experiments. Cambridge University Press, 2012. 586 p.
30. *Allen T. T.* Introduction to engineering statistics and lean six sigma: statistical quality control and design of experiments and systems. Springer London, 2019. 633 p.
31. *Винарский М. С., Лурье М. В.* Планирование эксперимента в технологических исследованиях. Киев: Техника, 1975. 168 с.
32. *Бит Ю. А., Вавилов С. В.* Измерение объёмов круглых лесоматериалов: Справочник. СПб.: ООО «Профикс», 2008. 361 с.

References

1. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. Calculation of the strength of a modernized flat-flow unit. *Resources and Technology*, 2023, vol. 20, no. 1, pp. 1—25. doi: 10.15393/j2.art.2023.6623. (In Russ).
2. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. *Improved systems of raft timber alloy: [monograph]*. Saarbrücken (Germany), Publishing house LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 284 p. (In Russ).
3. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. The use of flat splice units on the initial timber alloy. *Izvestiy vuzov. Lesnoi zhurnal*, 2022, no. 1, pp. 128—142. doi: 10.37482/0536-1036-2022-1-128-142. (In Russ.).
4. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. Substantiation of the indicator of the flexibility of a raft of raft units. *Izvestiy vuzov. Lesnoi zhurnal*, 2022, no. 4, pp. 146—155. doi: 10.37482/0536-1036-2022-4-146-155. (In Russ).
5. Vasiliev V. V. Calculation of transport and operational indicators of an improved flat-flow unit. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 4, pp. 1—22. doi: 10.15393/j2.art.2022.6365. (In Russ.).

6. Perfiliev P., Zadrauskaite N., Rybak G. Study of hydrodynamic resistance of a raft composed of the flat rafting units of various draft. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18 (1.5)*. Austria, 2018, pp. 765—772.
7. Patent 2882723 FR, Int. THIS.8 B63B 35/00, 3/08, 7/02. Modular boat for the transport of logs by water. Applicant Roumengas Jonsa Guy; Agent SCHMITT. No.0502132; the date of application 03.03.05; the date of publication 21.10.2005, bulletin 06/36. 14 p.
8. Wire Rope Industries Ltd., Pointe-Claire, Canada. Patent 5119529 USA, Int. CI.5 B63B 35/62. Cable hook. No. 703,844; filed: 21.05.1991; date application 09.06.1992.
9. Wilfred Spry Brodie, P. O. Box 175, Gibsons, British Columbia, VON 1VO, Canada. Patent 3971309 USA, Int. CI.2 B63 B 27/16. Log bundling apparatus and method of bundling logs. No. 566,904; filed: 10.04.1975; date application 27.07.1976.
10. M. Ray Holden, P. O. Box 716, Ketchikan, Alaska. Patent 3556319 USA, Int. CI. B63b 27/16. Log-bundling apparatus. No. 857,247; filed: 30.06.1969; date application 19.01.1971.
11. Vasiliev V. V. Calculation of transport and operational indicators of an improved flat-flow unit. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 4, pp. 1—22. doi: 10.15393/j2.art.2022.6365. (In Russ.).
12. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. Substantiation of geometric parameters of a highly efficient flat-flow unit. *Resources and Technology*, 2023, vol. 20, no. 2, pp. 1—19. doi: 10.15393/j2.art.2023.6763. (In Russ.).
13. Vasiliev V. V., Barabanov V. A. Analysis of the results of testing a raft of flat raft units in the Severodvinsk basin. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice: Mater. international scientific and Technical conference «Technology and Technologies — a bridge to the future»*. Voronezh, VGLTA, 2014, no. 5, part 4 (10-4), pp. 67—72. (In Russ.).
14. Vasiliev V. V. Features of the formation of the precipitation of a flat flat unit. *Forestry journal VGLTA*, 2014, no. 1 (13), pp. 79—84. (In Russ.).
15. Vasiliev V. V. A cohesive unit for rivers with shallow depths. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. International scientific and technical conference «Mechanics of technological processes in the forest complex»*. Voronezh, VGLTA, 2014, no. 2, part 3 (7-3), pp. 41—45. doi: 10.12737/3184. (In Russ.).
16. Mitrofanov A. A. *Lesosplav. New technologies, scientific and technical support: [monograph]*. Arkhangelsk, Publishing house of AGTU, 2007. 492 p. (In Russ.).
17. Vasiliev V. V., Aksenov I. I. Analysis of the designs of promising flat cohesive units. *Improving the efficiency of the use of resources in the production of agricultural products — new technologies and equipment of a new generation for the agro-industrial complex: collection of scientific reports of the XX International Scientific and practical Conference. Tambov, September 26—27, 2019*. Tambov, Publishing House «Printing Studio Galina Zolotova», 2019, pp. 188—191. (In Russ.).
18. Vasiliev V. V. An improved flat cohesive unit with an increased full-weight coefficient. *Science and education at the present stage of development: experience, problems and ways to solve them: materials of the International scientific and practical conference (Russia, Voronezh, November 25, 2022)*. Voronezh, Voronezh State Pedagogical University, 2022, pp. 37—43. (In Russ.).
19. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Abramov V. V., Pozdnyakov E. V. Patent 2777676 R. F., IPC B65B 35/02. Flat splice unit. Applicant and patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry University

- named after G. F. Morozov» (RU). No. 2021140062; application 30.12.2021; publ. 08.08.2022, Byul. No. 22. 8 p. (In Russ.).
20. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Loschenko A. V. Patent 213802 R. F., IPC B60R 3/41. Cargo platform. Applicant and patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I» (RU). No. 2022123837; application 08.09.2022; publ. 29.09.2022, Byul. No. 28. 10 p. (In Russ.).
 21. Angela Dean, Daniel Voss, Danel Draguljić. *Design and analysis of experiments*. Springer International Publishing, 2017. 852 p.
 22. Bate S. T., Clark R. A. *The design and statistical analysis of animal experiments*. CUP, 2014. 328 p.
 23. David Lightbown. *Designing the user experience of game development tools*. A K Peters CRC Press, 2015. 164 p.
 24. Dharmaraja Selvamuthu, Dipayan Das. *Introduction to statistical methods, design of experiments and statistical quality control*. Springer Singapore, 2018. 445 p.
 25. Gezan Salvador Alejandro. *Statistical methods in biology: design and analysis of experiments and regression*. Chapman & Hall/CRC, 2014. 616 p.
 26. Mathews Paul G. *Design of experiments with MINITAB*. American Society for Quality (ASQ), 2005. 521 p.
 27. Oehlert G. W. *A first course in design and analysis of experiments*. Freeman, 2010. 680 p.
 28. Russell R. Rhinehart. *Applications: modeling, model validation, and enabling design of experiments*. Wiley-ASME Press, 2016. 400 p.
 29. Mead R., Gilmour S. G., Mead A. *Statistical principles for the design of experiments: applications to real experiments*. Cambridge University Press, 2012. 586 p.
 30. Theodore T. Allen. *Introduction to engineering statistics and lean six sigma: statistical quality control and design of experiments and systems*. Springer London, 2019. 633 p.
 31. Vinarsky M. S., Lurie M. V. *Experiment planning in technological research*. Kiev, Technique, 1975. 168 p. (In Russ.).
 32. Bit Yu. A., Vavilov S. V. *Measurement of volumes of round timber*. Directory. Saint Petersburg, Profix LLC, 2008. 361 p. (In Russ.).

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7243

УДК 536.2

Статья

Теплопроводность снежного покрова и физические процессы, происходящие в нём под влиянием температурного градиента

Борисов Вячеслав Алексеевич

кандидат технических наук, доцент, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (Российская Федерация), vborisov@bmstu.ru

Акинин Дмитрий Вячеславович

кандидат технических наук, доцент, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (Российская Федерация), akinin.dmitrij2013@yandex.ru

Гасилина Мария Алексеевна

магистрант, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (Российская Федерация), gasilinamaria539@gmail.com

Романова Анастасия Романовна

магистрант, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (Российская Федерация), nasty1999g@mail.ru

Получена: 22 июля 2023 / Принята: 3 ноября 2023 / Опубликовано: 17 ноября 2023

Аннотация: Снег как дорожно-строительный материал представляет собой совокупность фаз вещества одной природы, но разных агрегатных состояний. Снег как полотно пути есть сложная пространственная система, которая в топологическом плане определяется как полирельефная, полизональная, полислоистая, полидисперсная среда. В природных условиях снеговой покров находится под воздействием различных температурных условий по высоте. Верхние слои находятся под влиянием непрерывно меняющейся температуры наружного воздуха, нижние слои соприкасаются с почвой, имеющей в зимнее время температуру, значительно более высокую и устойчивую, чем температура воздуха. Наличие разности между температурами верхнего и нижнего слоёв обуславливает протекание в снеговом покрове процессов, связанных с различной упругостью водяных паров, насыщающих пространство над снежными зёрнами. Из нижних слоёв, имеющих обычно более высокую температуру и, следовательно, более высокую максимальную насыщенную упругость водяных паров,

происходит перемещение паров в верхние слои, где температура, а также упругость паров меньше. Для уточнения зависимости коэффициента теплопроводности от плотности в зоне больших значений плотностей авторами поставлены исследования по изучению тепловых свойств снега различной плотности, которые проводились в МГТУ им. Н. Э. Баумана и стали продолжением начатых ранее разработок [1]. При постановке исследования авторами были намечены две основные задачи: обнаружение процесса возгонки и сублимации в снежном массиве, находящемся в неоднородном температурном поле, с последующим выявлением количественной стороны этого процесса и интенсивности его протекания в зависимости от плотности снега. Также определялся коэффициент теплопроводности снега различной плотности.

Ключевые слова: снежный массив; плотность снега; свойства снега; зимняя лесная дорога; коэффициент теплопроводности снега

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7243

Article

Thermal conductivity of snow cover and physical processes occurring in it under the influence of temperature gradient

Vyacheslav Borisov

Ph. D. in engineering, associate professor, Moscow State Technical University named after N. E. Bauman (Russian Federation), vborisov@bmstu.ru

Dmitry Akinin

Ph. D. in engineering, associate professor, Moscow State Technical University named after N. E. Bauman (Russian Federation), akinin.dmitrij2013@yandex.ru

Maria Gasilina

student in the master's program, Moscow State Technical University named after N. E. Bauman (Russian Federation), gasilinamaria539@gmail.com

Anastasia Romanova

student in the master's program, Moscow State Technical University named after N. E. Bauman (Russian Federation), nasty1999g@mail.ru

Received: 22 July 2023 / Accepted: 3 November 2023 / Published: 17 November 2023

Abstract: Snow as a road construction material is a combination of phases of the same nature but different aggregate states. Snow as a road surface is a complex spatial system that is topologically defined as a poli-relief, polizonal, multi-layered, and polydisperse medium. In natural conditions, the snow cover is subjected to different temperature conditions at different heights. The upper layers are influenced by continuously changing external air temperature, while the lower layers are in contact with the soil, which has a significantly higher and more stable temperature than that of the air. The temperature difference between the upper and lower layers leads to processes in the snow cover related to different elasticities of water vapors saturating the space above the snow grains. Water vapors move from the lower layers, which usually have higher temperatures and therefore higher maximum saturated vapor pressure, to the upper layers where the temperature and vapor pressure are lower. In order to determine the dependence of the thermal conductivity coefficient on density in the zone of high-density values, the authors conducted research on the thermal properties of snow of

different densities. The research was conducted at Bauman Moscow State Technical University, as a continuation of previous studies [1]. The authors set two main objectives for the research: to identify the process of sublimation and evaporation in a snow mass located in a non-uniform temperature field, and to determine the quantitative aspect and intensity of this process depending on the density of the snow. The thermal conductivity coefficient of snow with different densities was also determined.

Keywords: snow massif; snow density; snow properties; winter forest road; thermal conductivity coefficient of snow

1. Введение

В связи с применением на вывозке леса тяжёлых лесовозных автопоездов возникают повышенные требования к прочности покрытия временных лесных автодорог. На временных лесных (лесовозных) автомобильных дорогах применяют различные типы покрытий, такие как колейные; сборно-разборные; из железобетонных плит; деревянных щитов; гибких деревянных лент; хворостяной выстилки из хвороста и порубочных остатков, засыпанные дренирующим грунтом или гравием; грунтовые профилированные, а также в труднодоступных районах нашей страны широко используются дороги, построенные из снега и льда.

В нашем исследовании мы рассмотрим снег как дорожное покрытие, которое является сложной пространственной системой, которая в топологическом плане определяется как полирельефная, полизональная, полислоистая, полидисперсная среда. В природных условиях снеговой покров находится под воздействием различных температурных условий по высоте. Верхние слои находятся под влиянием непрерывно меняющейся температуры наружного воздуха, нижние слои соприкасаются с почвой, имеющей в зимнее время температуру, значительно более высокую и устойчивую, чем температура воздуха.

Зависимость упругости водяных паров от температуры показана на рисунке 1. Как видно, разница давлений достигает довольно значительной величины, что позволяет водяным парам преодолевать сопротивление их движению [2].

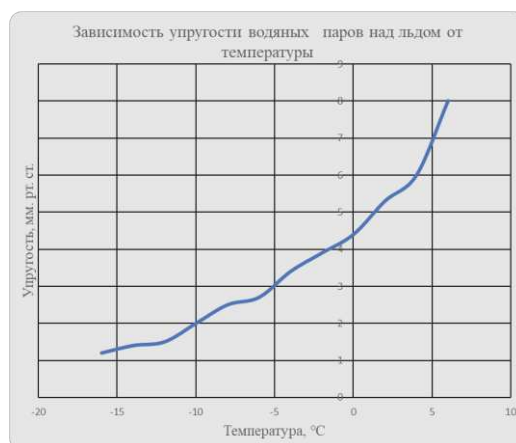


Рисунок 1. Зависимость упругости водяных паров над льдом от температуры

Figure 1. Dependence of the elasticity of water vapor over ice on temperature

Так, например, при разности температур в интервале от -1 до -11 °C разница давлений составляет 2,469 мм рт. ст. (0,003292 бара). Вследствие такого переноса происходит перенасыщение воздуха лежащих выше слоёв снежного покрова водяными парами и в дальнейшем сублимация водяного пара, оседающего на снежных зёрнах. Но уход водяных паров из нижних слоёв создаёт там ненасыщенное пространство, что приводит

к дополнительному парообразованию, т. е. переходу снега из твёрдой фазы в газообразную. Как известно, каждому агрегатному состоянию вещества отвечают определённые для данного тела физические величины, соответствующие переходу его из одной фазы в другую, которые связаны между собой формулой Томсона

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{A(v_2 - v_1)}{L},$$

где T — абсолютная температура превращения фазы с удельным объёмом v_1 в фазу с удельным объёмом v_2 ; P — давление; L — теплота изменения фазы; A — термический эквивалент работы.

Построив для условий перехода из одной фазы в другую кривые Θ — P в координатах, мы имеем для каждого тела три свойственные ему кривые:

- 1) плавления — затвердевания;
- 2) испарения — конденсации;
- 3) возгонки — сублимации.

Все эти кривые пересекаются в одной точке, называемой тройной точкой и характеризующейся тем, что в ней могут существовать все три фазы одновременно, т. е. тело может находиться в твёрдом, жидком и газообразном состоянии. Для воды при атмосферном давлении этой точке соответствует температура $+0,01$ °C. В природных условиях нижние слои снега имеют обычно более низкую температуру — порядка $-4 \dots -2$ °C. Прямая A — E (рисунок 2), являющаяся продолжением кривой кипения в сторону более низких температур и давлений, соответствует условиям равновесия переохлаждённой жидкости и пара, насыщающего пространство над ней. Отсюда можно видеть, что для одной и той же температуры, если только она ниже температуры тройной точки, упругость пара, насыщающего пространство над переохлаждённой жидкостью, больше упругости пара, насыщающего пространство над твёрдым телом. Численные значения этих величин можно взять из графиков, изображённых на рисунках 7—14.

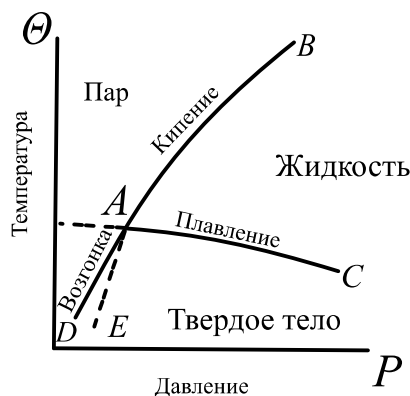


Рисунок 2. Схематичная диаграмма фаз

Figure 2. Schematic diagram of phases

Если рядом находится переохлаждённая жидкость и твёрдое тело (снег), то такая система не будет устойчивой, пары воды будут переходить к твёрдому телу и охлаждаться на нём до полного исчезновения жидкой фазы. Это даёт нам возможность предполагать, что компенсация ушедших из нижних слоёв паров будет происходить за счёт непосредственного перехода снега из твёрдого состояния в газообразное, т. е. за счёт возгонки снежных частиц без перехода их в жидкую фазу и последующего испарения.

Таким образом, с течением времени нижние слои снежного покрова будут несколько разрыхляться, а более верхние слои — уплотняться. Помимо уменьшения плотности нижние слои будут подвергаться ещё некоторому изменению, связанному с трансформацией структуры составляющих их снежных зёрен.

Всякое добавочное давление, оказываемое на поверхность жидкой или твёрдой фазы, приводит к некоторому смещению тройной точки — к смещению кривых кипения и возгонки в сторону больших давлений. Таким добавочным давлением для жидкой фазы является нормальное давление, вызываемое поверхностным натяжением. Это давление тем больше, чем меньше радиус r капли жидкости, и выражается формулой

$$P = \frac{2a}{r},$$

где a — коэффициент (для воды при $\Theta = 0^\circ\text{C}$ $a = 8$ мг/мм).

Отсюда следует, что упругость паров над поверхностью большей кривизны больше, чем над поверхностью меньшей кривизны, вследствие чего будут происходить переход паров от меньших капель к большим, которые и будут расти за счёт мелких. Так как поверхностное натяжение имеет место и у твёрдых тел, то всё сказанное о каплях справедливо также и для снежных частиц.

Чем меньше размеры частиц снега, тем больше упругость паров над ней. Особенно значительно такое «сгущение» давления на выступающих концах и остриях снежинок. В связи с этим мелкие частицы испаряются (возгоняются) быстрее крупных и происходит сглаживание выступающих концов — снег делается более крупнозернистым, пористым и менее связанным [3], [4].

Это явление отмечает ряд исследователей (Г. Д. Рихтер [5], В. С. Морозов [6], Л. В. Барахтанов [7], А. В. Павлов [8], [9], Е. W. Washburn [10], Р. А. Чернов [11]). Образование слоя малосвязанного сыпучего снега имеет большее значение (например, в вопросе возникновения обвалов). В применении к снеговым дорожным покрытиям лесных автомобильных дорог перераспределение плотности в результате процесса — возгонки — сублимации выводит данное покрытие из строя.

В верхних слоях снегового покрытия лесной дороги образуется корка, лежащая на рыхлом основании. Подобное изменение в толще снегового покрытия можно назвать его старением. С другой стороны, не зашедший далеко процесс возгонки сублимации способствует увеличению прочности снегового покрова, т. к. пар, осевший на поверхностях сближенных

кристаллов, сублимируясь, может прочно спаивать ранее изолированные кристаллы. Помимо выявления этих процессов необходимо также получить характеристику теплоизолирующих свойств снегового покрова различной плотности, необходимой для определения возможности предохранения основания лесной дороги от замерзания.

Рыхлый снег обладает гораздо лучшими теплоизолирующими свойствами, чем плотный. Это объясняется тем, что снег представляет собой порошкообразное тело, т. е. смесь твёрдого тела (снежных зёрен) и воздуха. В обычных условиях теплопроводность порошков зависит, главным образом, от заключённого в них газа; доля проводимости через вещество самих зёрен незначительна. Так как воздух — очень плохой проводник тепла [его коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,0244$ Вт/(м·град.)], то увеличение количества его в снежном покрове приводит к уменьшению теплопроводности снега.

О тепловых свойствах снега в естественном состоянии имеется значительная литература. Исследования по определению коэффициента внутренней теплопроводности и коэффициента температуропроводности были проведены Г. Абельсом [12], И. Р. Стаховским [13], А. Ф. Миддендорфом [14], П. П. Кузьминым [15] и рядом других исследователей [16], [17], [18], [19].

Для определения теплопроводности Г. Абельс применял формулу Пуассона, выражающую уменьшение амплитуды колебаний температуры с глубиной:

$$\lg A_x = \lg A_0 - B_x, \quad (1)$$

где A_x — амплитуда температуры на глубине x под поверхностью; A_0 — амплитуда на поверхности.

Зная амплитуду на глубине x и на поверхности, можно вычислить константу B . Величина B выражается ещё следующим образом:

$$B = \lg e \frac{1}{a} \sqrt{\frac{\pi}{T}}, \quad (2)$$

где a — коэффициент температуропроводности; T — период.

Из формулы (2) коэффициент температуропроводности выразится:

$$a^2 = \frac{\pi(\lg e)}{TB^2}. \quad (3)$$

Г. Абельс установил, что $a = 0,0133 \rho \text{ см}^2/\text{с}$ (ρ — плотность снега).

Принимая (по Десену и Пирсону) удельную теплоёмкость снега равной удельной теплоёмкости льда [0,508 ккал/(кг °С)], Г. Абельс, пользуясь формулой, связывающей коэффициенты температуропроводности и теплопроводности $a^2 = \frac{\lambda}{\rho c}$, находит следующую зависимость λ от ρ :

$$\lambda = 0,0068\rho^2.$$

Аналогичными методами определяли теплопроводность снега С. А. Арцыбашев и В. М. Южаков [20], [21]. Метод основан на определении теплопроводности слоя снега путём сравнения с известной теплопроводностью слоя другого тела [22], [23]. Например, С. А. Арцыбашев рядом с исследуемым слоем снега помещал пластинку из парафина. Тепловые потоки через оба слоя должны быть одинаковы:

$$\lambda_1 \frac{(\Delta\theta)}{(\Delta H)_1} = \lambda_2 \frac{(\Delta\theta)_2}{(\Delta H)_2},$$

где λ — коэффициент теплопроводности; ΔH — толщина слоя; $\Delta\theta$ — разность температур на границах слоя.

Зная ΔH и $\Delta\theta$ из опыта и λ_1 или λ_2 , определяем из уравнения другое λ .

Янсон [26] дал следующую эмпирическую формулу зависимости λ от ρ :

$$\lambda = 0,00005 + 0,0019\rho + 0,006\rho^4.$$

П. П. Кузьминым в полевых условиях был применён метод определения коэффициента температуропроводности a при неустановившемся тепловом режиме путём непосредственного определения $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ и $\frac{\Delta^2\theta}{\Delta x^2}$, входящих в основное уравнение теплопередачи — уравнение Фурье:

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = a^2 \frac{\Delta^2\theta}{\Delta x^2}. \quad (4)$$

На основе данных о температуре снега в некоторые определённые моменты времени на нескольких глубинах П. П. Кузьмин, пользуясь методом конечных разностей, определил первую и вторую производные температуры по глубине $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ и $\frac{\Delta^2\theta}{\Delta x^2}$, а также и производную температуры по времени. Подставляя найденные значения в основное уравнение теплопроводности (4), он определял a , а затем, после замеров плотности, и λ .

Вычисленные этим методом значения дали большие колебания. Так, например, для плотности $\rho = 0,3 \text{ г/см}^3$ П. П. Кузьмин получил коэффициенты теплопроводности 0,012552; 0,028033; 0,31380 (Вт./м К).

В таблице 1, составленной в порядке возрастающей плотности, даны значения a и λ , полученные различными авторами.

Таблица 1. Значения теплопроводности λ и коэффициента температуропроводности a от плотности

Table 1. The values of thermal conductivity λ and the coefficient of thermal conductivity a of density

Плотность, г/см ³	Автор	a , см ² /с	λ , Вт./м К	По формуле Г. Абеляса		По формуле И. К. Янсона	
				a , см ² /с	λ , Вт./м К	a , см ² /с	λ , Вт./м К
0,12	Рейнс	0,0016	0,0418	—	—	—	—
		0,0026	0,08367	0,0016	0,0418	0,00416	0,1171
0,125	Курада	0,0083	0,21757	0,0017	0,04435	0,00416	0,12136
0,13	Арцыбашев, Южаков	0,0078	0,2113	0,00177	0,04811	0,00461	0,12552
0,16	Керенен	0,0026	0,08786	—	—	—	—
		0,0058	0,1966	0,0021	0,07112	0,0045	0,15062
0,17	Арцыбашев, Южаков	0,006	0,21464	—	—	—	—
		0,0062	0,2217	0,00235	0,08368	0,00435	0,154808
0,18	Окада	0,0031	0,1171	0,00244	0,09205	0,00434	0,16317
0,19	Миддендорф	0,003	0,1171	—	—	—	—
	Арцыбашев, Южаков	0,0066	0,2636	0,0025	0,09623	0,00432	0,17154
		0,0015	0,0586	—	—	—	—
	Кузьмин	0,0018	0,0711	—	—	—	—
		0,0022	0,08786	—	—	—	—
0,20	Арцыбашев, Южаков	0,006	0,2510	0,0027	0,11297	0,0043	0,17991
0,21	Арцыбашев, Южаков	0,0057	0,2510	0,0029	0,1255	0,00428	0,188279
0,24	Окада	0,0038	0,1883	0,00325	0,16317	0,00442	0,22175
0,25	Миддендорф	0,006	0,2510	—	—	—	—
		0,0043	0,2259	—	—	—	—
	Кузьмин	0,0055	0,2887	0,0034	0,17781	0,00424	0,22175
0,27	Онгстрем	0,00363	0,2050	0,00436	0,24685	0,00415	0,23430
0,30	Миддендорф	0,006	0,3765	0,0048	0,30124	0,00414	0,25941
		0,0002	0,01255	—	—	—	—
	Кузьмин	0,00045	0,2803	—	—	—	—
		0,0050	0,31379	—	—	—	—
0,33	Миддендорф	0,006	0,41421	0,0045	0,30961	0,00425	0,29288
		0,0008	0,05439	—	—	—	—
	Кузьмин	0,0045	0,3096	—	—	—	—
0,35	Эндрюс	0,00628	0,46023	0,00463	0,33890	0,00456	0,33472
0,37	Кох, Вегенер	0,0189	0,6276	0,00503	0,38911	0,0046	0,35564
0,54	Ингерсоль, Кепп	0,00628	0,7113	0,00742	0,8368	0,006	0,67781

Как показывает таблица 1 и соответствующий ей график (рисунок 3), значения коэффициентов теплопроводности, установленные различными авторами, довольно резко отличаются друг от друга. Например, для плотности 0,19 коэффициент теплопроводности по П. П. Кузьмину в четыре раза меньше коэффициента теплопроводности, полученного С. А. Арцыбашевым. Это несоответствие указывает на недостаточную в настоящее время изученность теплопроводности снега.

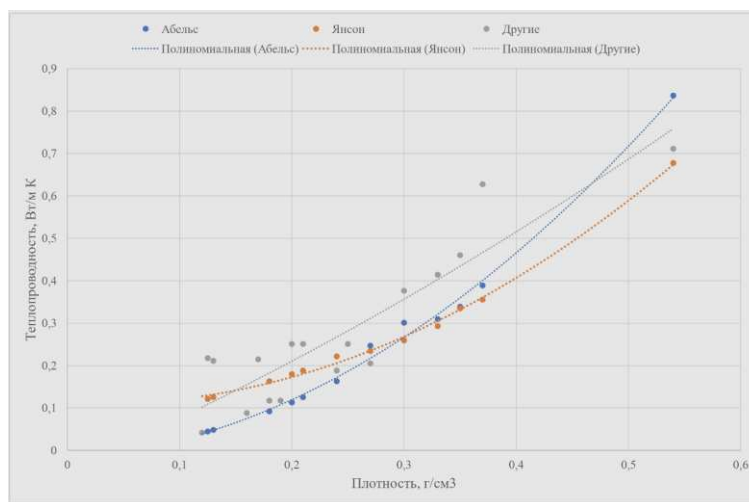


Рисунок 3. Значения коэффициентов теплопроводности снега по данным различных авторов

Figure 3. Values of snow thermal conductivity coefficients presented by various authors

Почти все исследования касаются снега в естественном состоянии, т. е. сравнительно небольшой плотности, в то время как искусственно уплотнённый снег, соответствующий состоянию снега на зимних дорогах, изучен недостаточно широко.

Для уточнения зависимости коэффициента теплопроводности от плотности в зоне больших значений плотностей авторами поставлены исследования по изучению тепловых свойств снега различной плотности.

2. Материалы и методы

Исследование основывается на основах аналитической теории и положениях теплопроводности сплошной среды при молекулярном переносе теплоты, обусловленном разностью температур между различными частями исследуемого тела, а также теории колёсных и гусеничных транспортных средств: при осуществлении расчётов и аппроксимации полученных экспериментальных данных нами были использованы методы математического анализа и прикладной математики. Полученные зависимости коэффициента теплопроводности от плотности и температуры описываются полиномиальными

зависимостями четвёртого порядка с доверительной аппроксимацией, близкой к единице. Расчёты выполнены с использованием программы Microsoft Excel.

Исследования проводились в морозильной камере, позволяющей поддерживать стационарный температурный режим. Снег с заранее заданной плотностью набивался в деревянные ящики сечением 30×30 см, высотой 50 см. Ящики были снабжены металлическим днищем (рисунок 4) и устанавливались таким образом, чтобы дно соприкасалось с раствором поваренной соли, температура которого поддерживалась постоянной при помощи электрических тэнов, расположенных под днищем поддона, в который был налит раствор. Средняя температура раствора поддерживалась равной -1°C , температура воздуха -12°C . Таким образом, снег в ящиках оказывался под воздействием определённого температурного градиента по всей высоте. Вся установка тщательно изолировалась по боковой поверхности. Для измерения температуры воздуха, температуры раствора в поддоне и снега были установлены термопары. В ящиках они были установлены на различных горизонтах на расстоянии 10 см друг от друга. Все провода были выведены в смежную с камерой комнату, где подключались к соответствующей аппаратуре.

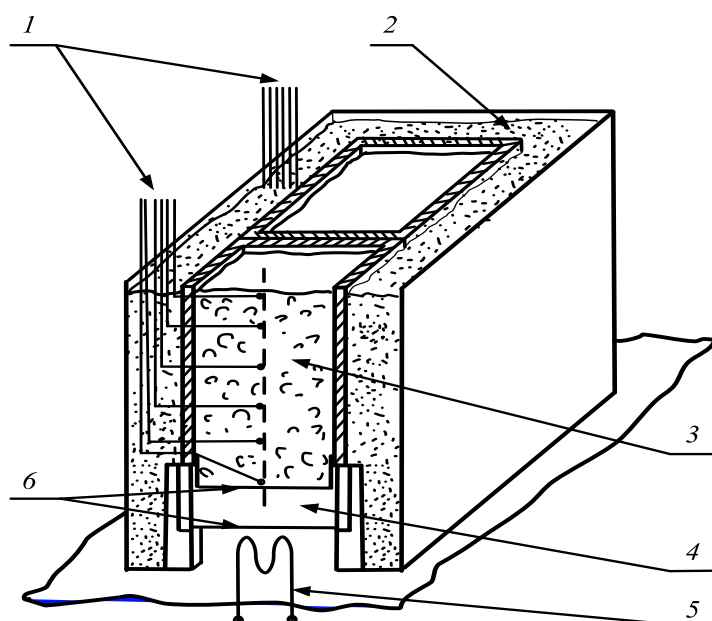


Рисунок 4. Схема установки: 1 — термопары; 2 — изоляция; 3 — снег; 4 — раствор NaCl; 5 — электрические нагреватели

Figure 4. Installation diagram: 1 — thermocouples; 2 — insulation; 3 — snow; 4 — NaCl solution; 5 — electric heater elements

Используя данную установку в своих исследованиях, авторы провели наблюдения за процессом возгонки — сублимации и определили значения коэффициента

теплопроводности. Для обнаружения процесса сублимации и количественной оценки предложено два метода.

Первый метод — весовой. Предлагаемая начальная плотность снега в образце, известном и одинаковом по всей высоте, взвешиванием в конце опыта определяется изменением плотности по слоям. Очевидно, нижний слой должен показывать некоторое уменьшение, а верхний — некоторое увеличение плотности по слоям. Однако этот метод пригоден лишь при полной однородности снега по плотности в начале опыта. Ввиду трудности соблюдения этого условия авторам пришлось воспользоваться другим методом.

С момента начала опыта, т. е. установки ящика на поддоны с раствором и создания теплового потока через толщу снега, велось непрерывное наблюдение за распределением температуры в снегу, т. е. за скоростью распространения теплового потока. Наблюдения велись до наступления установившегося режима теплопередачи, для которого затем строился график распределения температур по всей высоте образца. Этот график даёт прямую в случае однородного массива снега и ломанную — если снег по слоям не однороден. По истечении двух суток (48 ч) замеры температур проводились снова, и строился новый график. Для возможности сравнения отсчёты в том и другом случае следует производить при установившемся режиме и одинаковых краевых условиях, т. е. при одинаковых температурах верхней и нижней поверхностей снега.

При наличии процесса возгонки в нижних и сублимации в верхних слоях график распределения температур по высоте изменится. В связи с уменьшившейся плотностью теплопроводность нижнего слоя уменьшится, и изменение температуры по высоте внизу станет более резким. Наоборот, в верхних уплотнившихся слоях изменение температуры по высоте будет менее значительным.

Определив в конце опыта плотность по слоям и подсчитав, как будет указано ниже, коэффициенты теплопроводности для снега различной плотности, используя эти данные и график, можно найти коэффициент теплопроводности для каждого слоя в начале опыта. Учитывая функциональную зависимость λ от ρ , можно определить начальную плотность слоя.

По условиям эксперимента тепловой поток через толщу снега в первом и во втором случаях одинаков, толщина слоёв неизменна, поэтому

$$\lambda_1(\Delta\theta)_1 = \lambda_2(\Delta\theta)_2, \quad (5)$$

где индексы 1 и 2 обозначают соответствующие значения теплопроводности в начале и в конце опыта; $\Delta\theta$ — разность температур верхней и нижней поверхностей данного слоя.

Определяя разности температур $(\Delta\theta)_1$ и $(\Delta\theta)_2$ из графиков, зная λ_2 , можно из уравнения (5) легко найти λ_1 , а следовательно, и плотность снега ρ_1 . Сравнение первоначальной плотности ρ_1 с плотностью в конце опыта ρ_2 даёт возможность количественно выразить процесс сублимации.

Что касается второй поставленной задачи, то метод определения коэффициента внутренней теплопроводности λ необходимо подчинить условиям экспериментов для процесса сублимации. Наиболее приемлемым в этом случае оказался методом пластины с использованием имитационного моделирования для установившегося теплового режима. Отсчёты температуры снега по слоям производились при помощи термопар с момента установки образцов до момента установления стационарного режима. По данным наблюдений строились графики градиента температур по высоте для любого момента времени и график изменения температур каждого слоя во времени. По этим данным из основного уравнения теплопередачи Фурье

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = a^2 \frac{\Delta^2\theta}{\Delta x^2}.$$

Определяется коэффициент температуропроводности a^2 , связанный, как указывалось выше, с коэффициентом теплопроводности λ уравнением

$$a^2 = \frac{\lambda}{\rho c},$$

где c — удельная теплоёмкость; ρ — плотность снега.

Для обработки полученных данных и определения

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t}, \frac{\Delta^2\theta}{\Delta x^2}, \frac{\Delta\theta}{\Delta x}.$$

можно воспользоваться также и другими методами:

- Графический метод, применённый Патеном. По построенным кривым находим $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ и $\frac{\Delta\theta}{\Delta x}$, определяя эти величины углами наклона касательных, проведённых в данной точке

к данным кривым. По найденным значениям $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ для данного t строим кривую зависимости $\frac{\Delta\theta}{\Delta x}$ от t и аналогичным приёмом определяем $\frac{\Delta\theta^2}{\Delta x^2}$. Но этот метод имеет большую неточность, поэтому был исключён из рассмотрения.

- Метод, разработанный профессором Шмидтом, широко применяемый для решения задач теплопроводности при неустановившемся режиме, основанный на замене дифференциальных уравнений уравнениями в конечных разностях.

Если имеется образец, разбитый по высоте на слой малой, но конечной толщины Δx (в эксперименте $\Delta x = 0,1$ м), нумеруем эти слои индексами $n-1, n, n+1$ и т. д. Разбиваем на интервалы Δt , на протяжении каждого из которых температуру любого слоя будем считать постоянной. Отмечаем их индексами: $t-1, t, t+1$. При этом условии и принятой системе

обозначений под $(\theta_{n,i})$ следует понимать температуру в середине n -го слоя в течение t -го промежутка времени.

В середине n -го слоя в момент t , согласно рисунку 5, производные температуры по x имеют два значения, а именно:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta x}\right)_+ &= \frac{\theta_{n+1,t} - \theta_{n,t}}{\Delta x}, \\ \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta x}\right)_- &= \frac{\theta_{n,t} - \theta_{n-1,t}}{\Delta x}. \end{aligned}$$

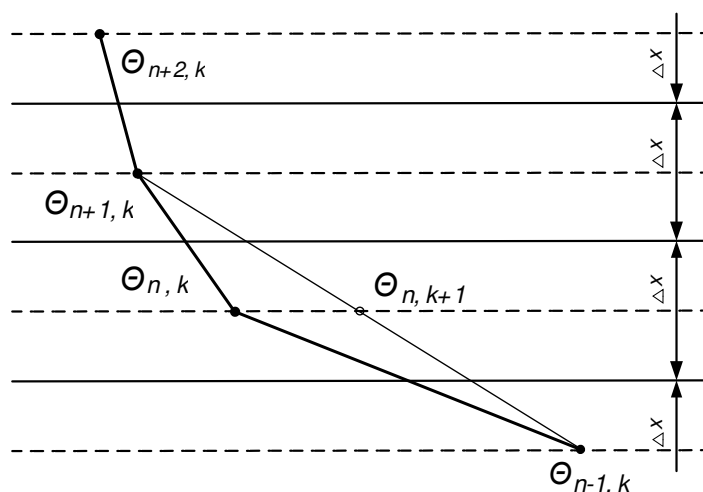


Рисунок 5. График к вычислениям по методу профессора Шмидта

Figure 5. Graph for calculations using the method of Professor Schmidt

Вторая производная от θ по x выражается следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\theta^2}{\Delta x^2} &= \frac{1}{\Delta x} \left\{ \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta x}\right)_+ - \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta x}\right)_- \right\} = \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{\theta_{n+1,t} - \theta_{n,t}}{\Delta x} - \frac{\theta_{n,t} - \theta_{n-1,t}}{\Delta x} \right), \\ \frac{\Delta\theta^2}{\Delta x^2} &= \frac{\theta_{n+1,t} + \theta_{n-1,t} - 2\theta_{n,t}}{\Delta x^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для производной от θ по времени t в рассматриваемой точке

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\theta_{n,t+1} - \theta_{n,t}}{\Delta t}. \quad (7)$$

Заменяя в уравнении Фурье производные соответствующими уравнениями в конечных разностях, получаем:

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = a^2 \frac{\Delta\theta^2}{\Delta x^2}$$

или, подставляя выражения (6) и (7), находим:

$$\theta_{n,t+1} - \theta_{n,t} = a^2 \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \cdot 2 \left(\frac{\theta_{n+1,t} + \theta_{n-1,t}}{2} - \theta_{n,t} \right).$$

Из этого уравнения находится a^2 и λ . Этот же метод в несколько изменённом виде был применён П. П. Кузьминым при его исследованиях теплопроводности снега. Однако для получения результатов с удовлетворительной точностью надо брать очень малые значения Δx (порядка 2—3 см) и производить наблюдения через малые промежутки времени.

Авторами применён метод аналитического решения дифференциального уравнения Фурье, т. е. составления уравнения распределения температур в образце. Подставляя в полученное уравнение значение $\theta_{x,t}$ на основе имеющихся графиков, решаем его относительно a^2 .

При решении основного уравнения теплопроводности нами были приняты следующие допущения:

- 1) плотность образца по всей высоте одинакова;
- 2) коэффициент теплопроводности по всей толщине одинаков и постоянен;
- 3) начальная температура по всему образцу одинакова;
- 4) температура верхней и нижней поверхности снега постоянна.

Приводим данное авторами аналитическое решение уравнения теплопроводности:

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta t} = a^2 \frac{\Delta \theta^2}{\Delta x^2}. \quad (8)$$

Граничные условия: при $x = 0$: $\theta_{(0,t)} = \theta_1$, при $x = l$: $\theta_{(l,t)} = \theta_2$.

Начальные условия: при $t = 0$: $\theta_{(x,0)} = \theta_3$.

$$\begin{aligned} \theta_{(x,t)} &= X_{(x)} T_{(t)}; \\ a^2 X'' T &= X T'; \frac{a^2 X''}{X} = \frac{T'}{T} = -m^2; T' + m^2 T = 0; \\ X'' + \frac{m^2}{a^2} X &= 0; T = C_{m e^{-m^2 t}}; X = A'_m \cos \frac{m}{a} x + B'_m \sin \frac{m}{a} x, \\ \theta_{(x,t)} &= \sum e^{-m^2 t} \left(A_m \cos \frac{m}{a} x + B_m \sin \frac{m}{a} x \right) + \theta_1 + \frac{\theta_2 - \theta_1}{l} \cdot x, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\theta_{(0,t)} = \sum e^{-m^2 t} A_m + \theta_1 = \theta_1; A_m = 0, \quad (10)$$

$$\theta_{(l,t)} = \sum e^{-m^2 t} B_m \sin \frac{m}{a} \cdot l + \theta_2 = \theta_2, \quad (11)$$

$$\begin{aligned}\sin \frac{m}{a} l &= 0; \frac{m}{a} \cdot l = n\pi; m = \frac{n\pi a}{l}, \\ \theta_{(x,t)} &= \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin \frac{n\pi}{l} \cdot x l^{\frac{-n^2 \pi^2 a^2}{l^2} t} + \theta_1 + \frac{\theta_2 - \theta_1}{l} \cdot x, \\ \theta_{(x,0)} &= \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin \frac{n\pi}{l} \cdot x + \theta_1 + \frac{\theta_2 - \theta_1}{l} \cdot x = \theta_3.\end{aligned}\quad (12)$$

Множим на $\sin \frac{n\pi}{l} \cdot x$, интегрируем от 0 до l :

$$\begin{aligned}\int_0^l \sin^2 \frac{n\pi x}{l} \cdot \Delta x &= \frac{l}{\pi} \int_0^{\pi} (1 - \cos 2n\xi) \cdot \Delta \xi = \frac{l\pi}{\pi} - \frac{l}{2\pi n} \sin 2n\xi \Big|_0^{\pi} = l, \\ \frac{\pi x}{l} &= \xi; \Delta x = \frac{l}{\pi} \Delta \xi, \\ \int_0^l \sin \frac{n\pi x}{l} \Delta x &= -\frac{l}{n\pi} \cos \frac{n\pi x}{l} \Big|_0^l = \begin{cases} \frac{2l}{n\pi} & \text{при } n \text{ нечётном} \\ 0 & \text{при } n \text{ чётном} \end{cases} \\ \int_0^l x \sin \frac{n\pi x}{l} &= \frac{l^2}{\pi^2} \cdot \int_0^{\pi} \xi \sin(n\xi) \cdot \Delta \xi = \frac{l^2}{\pi^2} \cdot \left\{ -\frac{1}{n} \cdot \xi \cos n\xi \Big|_0^{\pi} + \frac{1}{n} \int_0^{\pi} \cos n\xi \cdot \Delta \xi \right\} = \\ &= \frac{l^2}{\pi^2} \left\{ -\frac{(-1)^n}{n} \pi + \frac{1}{n^2} \sin n\xi \Big|_0^{\pi} \right\} = -\frac{l^2}{\pi n} (-1)^n; \\ \left[\frac{\pi x}{l} = \xi; \Delta x = \frac{l}{\pi} \Delta \xi \right]\end{aligned}$$

1. n — нечётное; $n = 2k + 1$. Из выражения (12) имеем:

$$\begin{aligned}B_{2k+1} l + \theta_1 \frac{2l}{n\pi} + \frac{\theta_2 - \theta_1}{n\pi l} l^2 &= \theta_3 \cdot \frac{2l}{n\pi}, \\ B_{2k+1} &= \frac{2\theta_3 - \theta_2 - \theta_1}{(2k+1) \cdot \pi}.\end{aligned}$$

2. n — чётное; $n = 2k$.

$$\begin{aligned}B_{2k} + \frac{\theta_2 - \theta_1}{l} \cdot \left(-\frac{l^2}{n\pi}\right) &= 0, \\ B_{2k} &= \frac{\theta_2 - \theta_1}{2k\pi}.\end{aligned}$$

Распределение температуры в теле даётся формулой

$$\theta_{(x,t)} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot e^{\frac{\pi^2 a^2 n^2}{l^2} t} \cdot \sin \frac{n\pi}{l} \cdot x + \theta_1 + \frac{\theta_2 - \theta_1}{l} \cdot x,$$

где коэффициенты B_n также определяются из выражения (12).

Так как $e^{\frac{-\pi^2 a^2 n^2 t}{l^2}}$ при увеличении n быстро убывает, то ограничиваемся двумя членами ряда, и тогда для распределения температуры в теле получаем:

$$\theta_{(x,t)} = \frac{2\theta_3 - \theta_2 - \theta_1}{\pi} \cdot e^{\frac{-\pi^2 a^2 t}{l^2}} \cdot \sin \frac{\pi x}{l} + \frac{\theta_2 - \theta_1}{2\pi} \cdot e^{\frac{-4\pi^2 a^2 t}{l^2}} \cdot \sin \frac{2\pi x}{l} + \theta_1 + \frac{\theta_2 - \theta_1}{l} \cdot x. \quad (13)$$

Пользуясь формулой (13), можно определить a^2 .

3. Результаты

Подвергнутые исследованию в ящиках образцы снега с плотностью 0,32; 0,34; 0,4; 0,5 были помещены в морозильную камеру. Такая значительная плотность получилась в результате перевозки ящиков, причём распределилась она неравномерно по высоте. Нижние слои оказались значительно плотнее верхних слоёв. В камере они выдерживались в течение двух суток при -14°C , затем были установлены поддоны, имеющие $\theta = -1^\circ\text{C}$. Наблюдения проводились через каждые 30—60 мин. в течение одних суток. На рисунке 6 приведён график изменения температуры по времени для плотности $\rho = 0,34 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

Для обработки взят небольшой интервал — от 6,5 до 10,5 ч. Наблюдения велись по трём слоям. Быстрее всего температура устанавливается в нижнем слое. По мере перехода к верхним слоям температура устанавливается более медленно.

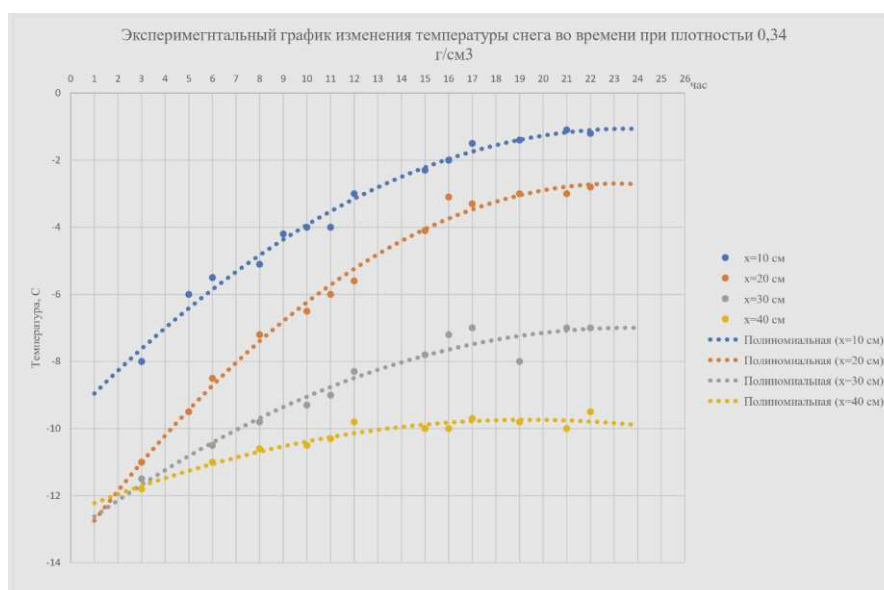


Рисунок 6. Экспериментальный график изменения температур снега во времени при плотности $0,34 \text{ г/см}^3$

Figure 6. Experimental graph of snow temperature changes over time at a density of 0.34 g/cm^3

Пользуясь уравнением (8), произведём расчёт коэффициента температуропроводности, беря значение $\theta_{x,t}$ с приведённого на рисунке 6 графика.

Начальные условия: $\rho_{cp} = 0,34 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}$; $\theta_1 = 0^\circ\text{C}$; $\theta_2 = -9,4^\circ\text{C}$; $\theta_3 = -12^\circ\text{C}$; $l = 0,4$ м.

По рисунку 6 для первого сечения имеем: $x = 0,1$ м. По формуле (8)

$$\theta_{(x,t)} = -\frac{9,4}{0,4} \cdot 0,1 + \frac{-2,12 + 9,4}{\pi} \cdot e^{\frac{-\pi^2 a^2 t}{0,4^2}} \cdot \sin \frac{0,1\pi}{0,4} - \frac{9,4}{2\pi} \cdot e^{\frac{-4a^2 \pi^2 t}{l^2}} \cdot \sin \frac{2\pi \cdot 0,1}{0,4}.$$

$$\theta_{(x,t)} = -2,3 - 4,71 \cdot 0,707 e^{\frac{-\pi^2 a^2 t}{l^2}} - 1,464 e^{\frac{-4a^2 \pi^2 t}{l^2}},$$

$$\theta_{(x,t)} = -2,3 - 3,33 e^{\frac{-\pi^2 a^2 t}{l^2}} - 1,464 e^{\frac{-4a^2 \pi^2 t}{l^2}}.$$

Для точки 1 имеем:

$$t = 9 \text{ ч}; \theta_{(0,1,9)} = 4,4^\circ\text{C}.$$

Пренебрегая вторым членом с показательной функцией, получим:

$$-4,4 = -2,3 - 3,33 e^{\frac{-\pi^2 a^2 t}{l^2}},$$

$$e^{\frac{-\pi^2 a^2 t}{l^2}} = \frac{2,1}{3,33} = 0,6305.$$

По таблицам

$$\frac{\pi^2 a^2 t}{l} = 0,461,$$

$$a^2 = \frac{0,4 \cdot 0,461}{\pi^2 \cdot 9} = 0,00083.$$

Подставляя полученное значение a^2 в член с показателем $\frac{4\pi^2 a^2 t}{l^2}$, находим уточнённое значение a^2 :

$$-4,4 = -2,3 - 3,33 e^{\frac{-\pi^2 a^2 t}{l^2}} - 1,464 e^{-1,844},$$

$$e^{-1,844} = 0,2315.$$

$$e^{\frac{-\pi^2 a^2 t}{l^2}} = \frac{1,8635}{3,33} = 0,5605,$$

$$\frac{\pi^2 a^2 t}{l^2} = 0,579,$$

$$a^2 = \frac{0,4^2 \cdot 0,579}{9\pi^2} = 0,00104 \text{ м}^2/\text{ч}.$$

По другим горизонтам подсчёты ведутся аналогично. Необходимые исходные данные для расчёта и результаты, полученные по формуле (13), приведены на рисунках 7—14.

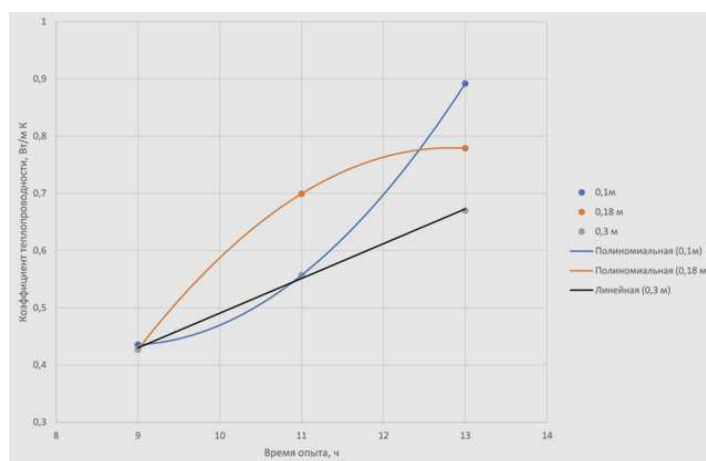


Рисунок 7. График зависимости коэффициента теплопроводности в различных слоях от времени опыта для 1-го ящика ($\rho_{\text{ср.}} = 0,320 \text{ г/см}^3$; $\Theta_1 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Theta_2 = -24 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Theta_3 = -12 \text{ }^\circ\text{C}$; $l = 0,40 \text{ м}$)

Figure 7. Dependence of the thermal conductivity coefficient in different layers on the time of the experiment for 1 box ($\rho_{\text{ср.}} = 0.320 \text{ g/cm}^3$; $\Theta_1 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Theta_2 = -24 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Theta_3 = -12 \text{ }^\circ\text{C}$; $l = 0.40 \text{ m}$)

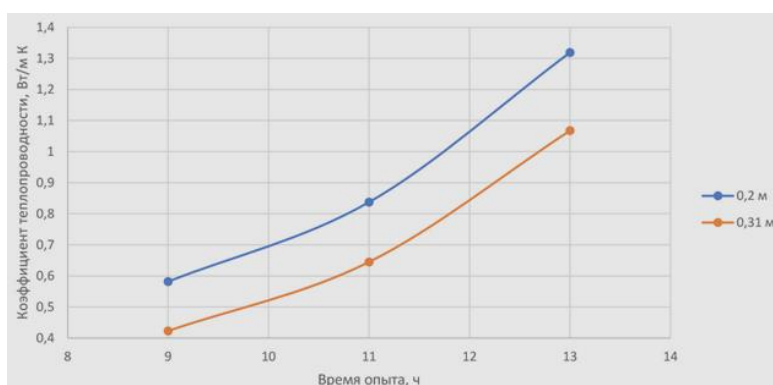


Рисунок 8. График зависимости коэффициента теплопроводности в различных слоях от времени опыта для 2-го ящика ($\rho_{\text{ср.}} = 0,340 \text{ г/см}^3$; $\Theta_1 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Theta_2 = -9,4 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Theta_3 = -12 \text{ }^\circ\text{C}$; $l = 0,40 \text{ м}$)

Figure 8. Dependence of the thermal conductivity coefficient in different layers on the time of the experiment for 2 boxes ($\rho_{\text{ср.}} = 0.340 \text{ g/cm}^3$; $\Theta_1 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Theta_2 = -9.4 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Theta_3 = -12 \text{ }^\circ\text{C}$; $l = 0.40 \text{ m}$)

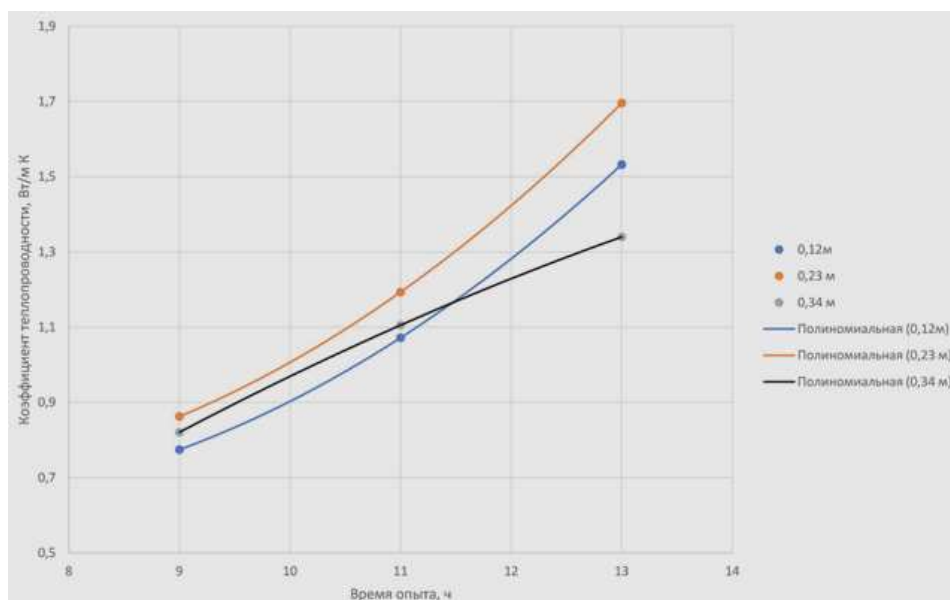


Рисунок 9. График зависимости коэффициента теплопроводности в различных слоях от времени опыта для 3-го ящика ($\rho_{\text{ср.}} = 0,500 \text{ г/см}^3$; $\Theta_1 = -1 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Theta_2 = -9,7 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Theta_3 = -12 \text{ }^\circ\text{C}$; $l = 0,50 \text{ м}$)

Figure 9. Dependence of the thermal conductivity coefficient in different layers on the time of the experiment for 3 boxes ($\rho_{\text{ср.}} = 0.500 \text{ g/cm}^3$; $\Theta_1 = -1 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Theta_2 = -9.7 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Theta_3 = -12 \text{ }^\circ\text{C}$; $l = 0.50 \text{ m}$)

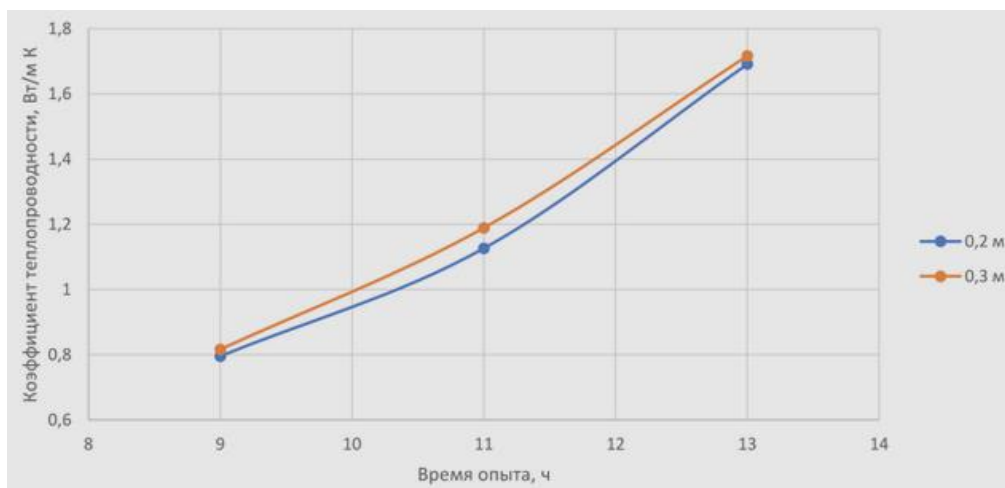


Рисунок 10. График зависимости коэффициента теплопроводности в различных слоях от времени опыта для 4-го ящика ($\rho_{\text{ср.}} = 0,500 \text{ г/см}^3$; $\Theta_1 = -1 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Theta_2 = -9,7 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Theta_3 = -12 \text{ }^\circ\text{C}$; $l = 0,50 \text{ м}$)

Figure 10. Dependence of the thermal conductivity coefficient in different layers on the time of the experiment for 4 boxes ($\rho_{\text{ср.}} = 0.500 \text{ g/cm}^3$; $\Theta_1 = -1 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Theta_2 = -9.7 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Theta_3 = -12 \text{ }^\circ\text{C}$; $l = 0.50 \text{ m}$)

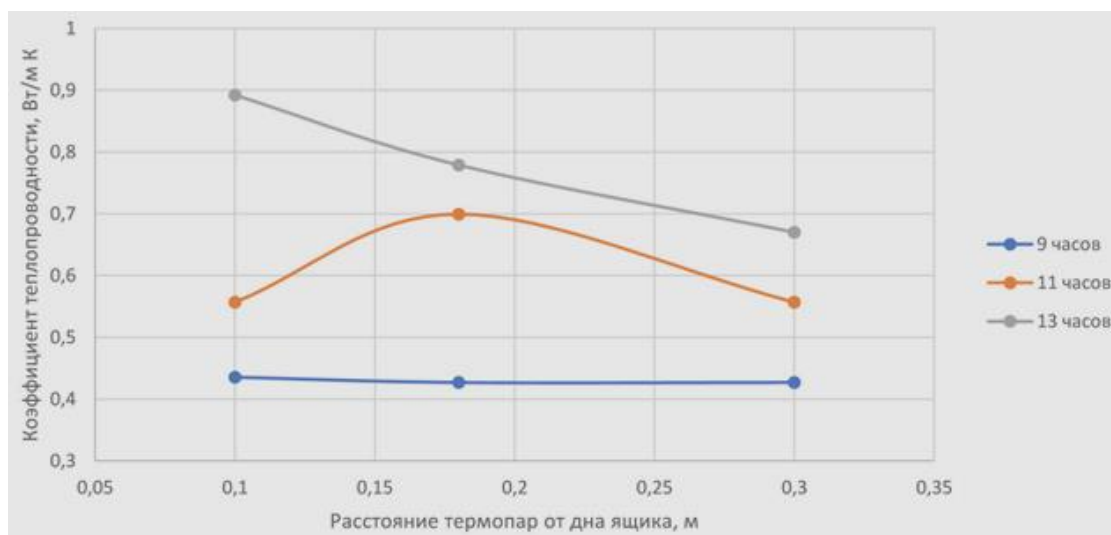


Рисунок 11. График зависимости коэффициента теплопроводности в зависимости от расстояния термопар от дна ящика, 1-й ящик

Figure 11. Dependence of the thermal conductivity coefficient on the distance of thermocouples from the bottom of the box, the first box

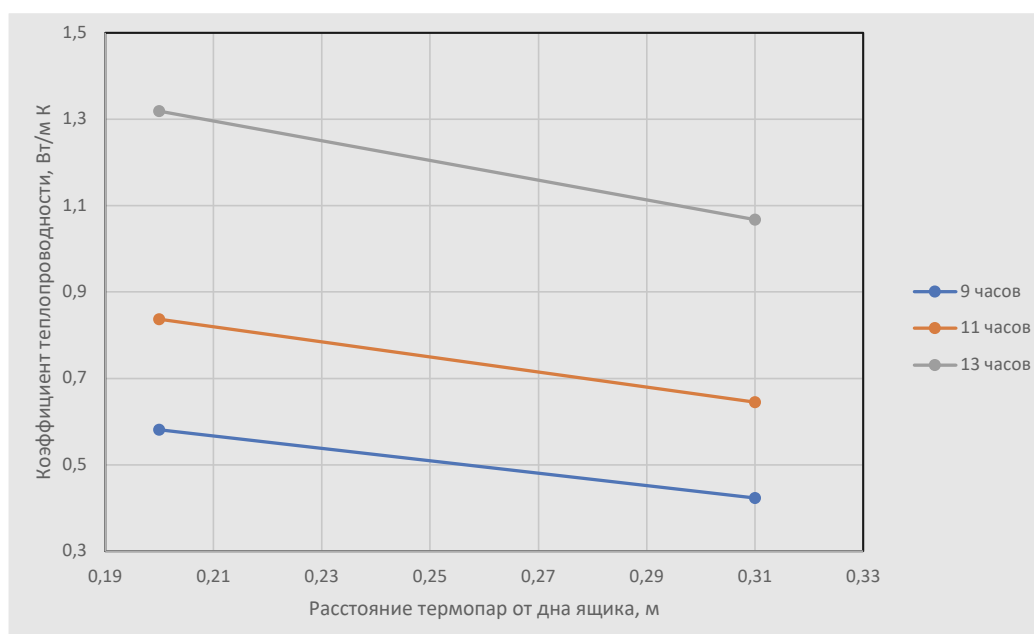


Рисунок 12. График зависимости коэффициента теплопроводности в зависимости от расстояния термопар от дна ящика, 2-й ящик

Figure 12. Dependence of the thermal conductivity coefficient on the distance of thermocouples from the bottom of the box, the second box

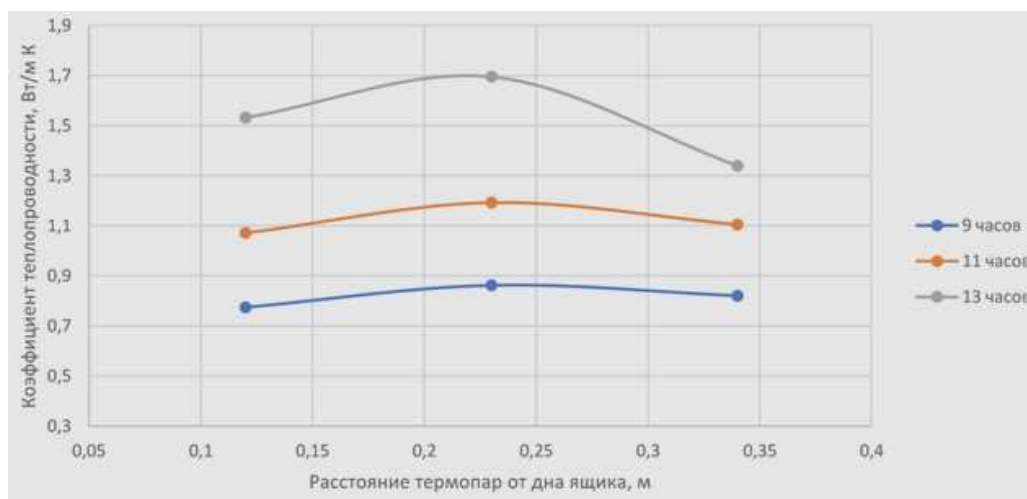


Рисунок 13. График зависимости коэффициента теплопроводности в зависимости от расстояния термопар от дна ящика, 3-й ящик

Figure 13. Dependence of the thermal conductivity coefficient on the distance of thermocouples from the bottom of the box, the third box

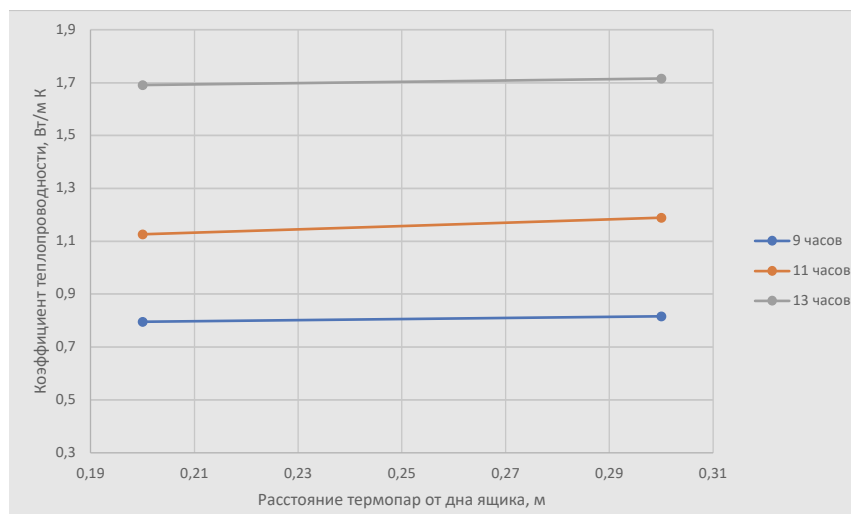


Рисунок 14. График зависимости коэффициента теплопроводности в зависимости от расстояния термопар от дна ящика, 4-й ящик

Figure 14. Dependence of the thermal conductivity coefficient on the distance of thermocouples from the bottom of the box, the fourth box

Измерения производились от 9 до 13 ч после начала опыта, т. е. за период, наиболее соответствующий принятым нами краевым условиям. Некоторый рост коэффициента λ с течением времени может быть объяснён тем, что при выводе уравнения принималось, что выравнивание температуры, т. е. установление стационарного режима, происходит в бесконечности, что не соответствует действительности.

На рисунках 15 и 16 приведены значения a^2 и λ , вычисленные для различных плотностей. Плотность принималась как средняя из плотностей слоёв, лежащих ниже уровня, на котором расположена термопара.

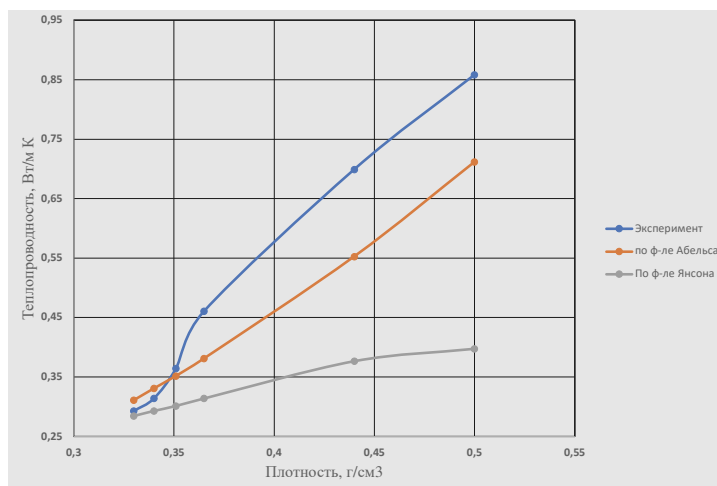


Рисунок 15. График зависимости теплопроводности для различных плотностей

Figure 15. Thermal conductivity plot for various densities

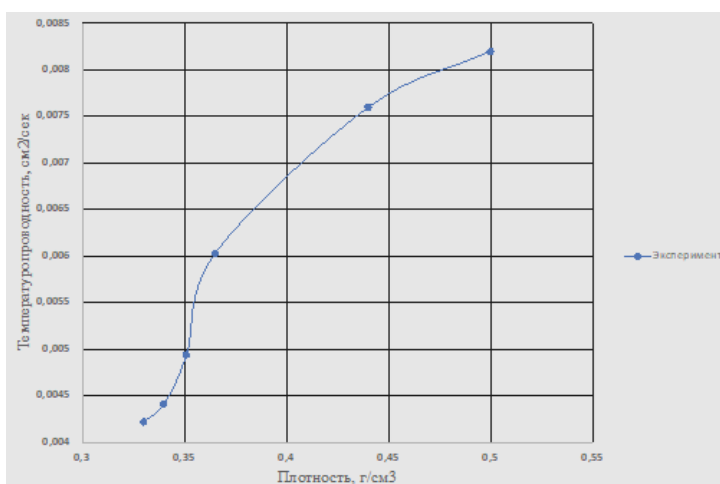


Рисунок 16. Экспериментальный график зависимости коэффициента температуропроводности для различных плотностей

Figure 16. Experimental graph of the dependence of the thermal conductivity coefficient for different densities

Анализ графиков на рисунках 15 и 16 показывает, что для плотности не выше 0,35 г/см³ наши экспериментальные данные имеют незначительные расхождения с данными Г. Абельса и зависимость λ и a^2 от плотности ρ может быть выражена формулой

$$a^2 = 0,0133\rho, \lambda = 2,8470\rho^2.$$

Для больших же плотностей эта зависимость не соблюдается, что может быть объяснено тем, что Г. Абельс производил исследования снега в естественном состоянии, когда его плотность не превышает 0,30—0,35 г/см³.

Зависимость λ и a от плотности ρ при плотности свыше 0,35 г/см³ может быть выражена следующими соотношениями:

$$a^2 = 0,0165\rho, \lambda = 3,5588\rho^2.$$

Значения λ и a^2 , полученные таким образом для больших плотностей, довольно близки к значениям, полученным ранее Энрюсом (см. таблицу 1 и рисунок 3).

Для наблюдения за процессом сублимации исследуемые образцы содержались под воздействием температурного градиента в течение 5 суток. Несмотря на такой небольшой срок, в образцах произошло перераспределение плотности, о котором можно было судить по измерению коэффициента теплопроводности (рисунок 17).

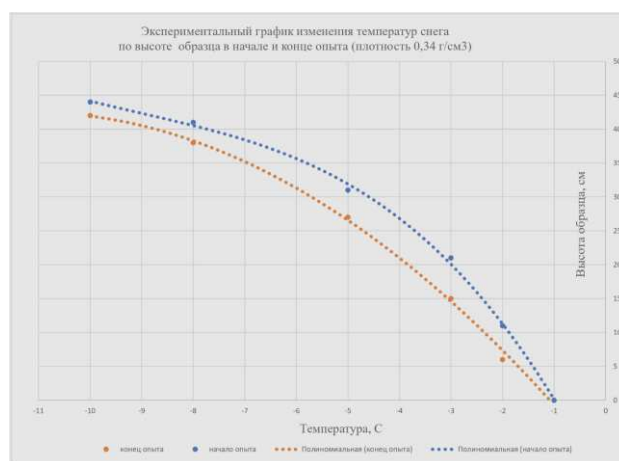


Рисунок 17. Экспериментальный график изменения температуры снега по высоте образца в начале и в конце опыта плотностью 0,34 г/см³

Figure 17. Experimental graph of snow temperature changes along the height of the sample at the beginning and at the end of the experiment with snow density of 0.34 g/cm³

Пользуясь предложенным нами методом, произведём расчёт перераспределения плотности для 2-го ящика с конечной средней плотностью 0,34 г/см³.

1. Для нижнего слоя от $x = 0$ до $x = 0,11$ м: $\rho = 0,37$ г/см³;

$$\lambda = 2,8470\rho^2 = 0,3897 \text{ Вт./м К.}$$

Беря из графика (см. рисунок 6) значения $(\Delta\theta)_1$ и $(\Delta\theta)_2$, получаем:

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_2(\Delta\theta)_2}{(\Delta\theta)_1} = \frac{0,3897 \cdot 0,85}{0,55} = 0,6023 \text{ Вт./м К.}$$

$$\rho_1 = \sqrt{\frac{\lambda_1}{3,5588}} = \sqrt{\frac{0,6023}{3,5588}} = 0,411 \text{ г/см}^3.$$

2. Для слоя от $x = 0,11$ до $x = 0,21$ м: $\rho_2 = 0,35$ г/см³;

$$\lambda_2 = \frac{0,4354 \cdot 0,85}{1,1} = 0,3364 \text{ Вт./м К.}$$

$$\rho_1 = \sqrt{\frac{0,3364}{2,8470}} = 0,343 \text{ г/см}^3.$$

3. Для слоя от $x = 0,21$ до $x = 0,31$ м: $\rho_2 = 0,35$ г/см³;

$$\lambda_1 = \frac{0,3487 \cdot 2,0}{1,9} = 0,3671 \text{ Вт./м К.}$$

$$\rho_2 = \sqrt{\frac{0,3671}{2,8470}} = 0,359 \text{ г/см}^3.$$

4. Для слоя от $x = 0,31$ до $x = 0,41$ м: $\rho_2 = 0,34$ г/см³;

$$\lambda_1 = \frac{0,3291 \cdot 2,9}{3,2} = 0,2982 \text{ Вт./м К.}$$

$$\rho_1 = \sqrt{\frac{0,2982}{2,8470}} = 0,323 \text{ г/см}^3.$$

Таким образом, за 5 суток произошёл перенос снега вследствие сублимации в количестве 0,135 г/см³ с горизонтов № 1, 2, 3 в лежащие выше слои. Отсутствие промежуточных отчётов и наблюдений при другом температурном градиенте не позволяет составить более детальную картину закономерностей, однако наблюдения показали, что процесс сублимации требует для своего осуществления чрезвычайно небольшого промежутка времени и, следовательно, сублимация может оказать значительное влияние на изменение физико-механических свойств покрытия из снега, широко используемого для устройства временных зимних лесных автомобильных дорог.

4. Заключение и выводы

Коэффициент теплопроводности снега является функцией его плотности. В зоне малых плотностей для выражения коэффициента теплопроводности в зависимости от плотности пригодно уравнение Абельса $\lambda = 2,84512\rho^2$ (Вт./м К). В зоне больших плотностей для искусственно уплотнённого снега значение коэффициента теплопроводности выше коэффициента, получаемого из уравнения Абельса. Наши наблюдения позволяют предложить зависимость $\lambda = 3,5564\rho^2$ (Вт./м К). Протекание процесса сублимации в снеговом покрове может привести к значительному перераспределению плотности снега и, следовательно, к изменению физико-механических свойств. Так, например, при наличии температурного градиента в 11 °С плотность в нижнем слое в течение 5 суток уменьшилась

на $0,08 \text{ г/см}^3$. Отсутствие достаточных экспериментальных данных не позволяет более детально судить о ходе процесса сублимирования.

Результаты исследования позволяют утверждать, что при строительстве временных сезонных зимних автодорог снег необходимо убирать с полотна дороги только при больших снегопадах. Это позволяет к весне накопить мощный слой хорошо уплотнённого снега, обеспечивающий вывозку по дороге до конца сезона. Кроме того, полученные результаты подтверждают рекомендацию о том, что при строительстве снежно-уплотнённых дорог снег первоначально необходимо перемешать, а затем уплотнить. Полученная плотная снежная масса под действием сублимации водяных паров, находящихся в промежутках между кристаллами снега, превращается в прочное снежное покрытие, удовлетворяющее современным реалиям используемого лесовозного транспорта на вывозке леса по временным снежным и снежно-ледяным автомобильным дорогам.

Список литературы

1. Борисов В. А., Акинин Д. В., Паюл А. Д. Некоторые вопросы изменения плотности снега при сжимающей нагрузке // Resources and Technology. 2021. Т. 18, № 3. С. 77—91.
2. Тарабанов М. Г., Коркин В. Д., Сергеев В. Ф. Влажный воздух: Справ. пособие. М.: НП АВОК, 2004. 50 с.
3. Узлов В. А., Шишков Г. И., Щербаков В. В. Основные физические параметры снежного покрова // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2014. С. 1—11.
4. Материалы гляциологических исследований. Международная классификация для сезонно-выпадающего снега (руководство к описанию снежной толщи и снежного покрова). Рус. изд. 2012-2.
5. Рихтер Г. Д. Снежный покров, его формирование и свойства. М.: Академия наук СССР, 1945. 15 с.
6. Морозов В. С. Расчёт однослойных зимних автомобильных дорог на прочность // Инновационная наука. 2015. № 11-2. С. 84—88.
7. Аникин А. А., Барахтанов Л. В., Донато И. О. Физико-механические свойства снега как полотна пути для движения машин // Наука и образование, МГТУ им. Н. Э. Баумана: Электронный журнал. 2010. № 10. С. 1—8.
8. Павлов А. В. Некоторые вопросы теплофизики снежного покрова // Тепловой баланс леса и поля. М.: Институт географии АН СССР, 1962. С. 186—201.
9. Павлов А. В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 286 с.
10. International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology. Vol. 1—3 / Ed. E. W. Washburn.
11. Чернов Р. А. Экспериментальное определение теплопроводности глубинной изморози // Лёд и Снег. 2013. № 3 (123). С. 71—77.
12. Абельс Г. Суточный ход температуры в снегу и зависимость между теплопроводностью снега и его плотностью // Метеорологический вестник. 1893. Т. 3.
13. Стаховский И. Р. Методы неравновесной физики в современной сейсмологии: к юбилею Института физики Земли РАН // Пространство и Время. 2018. С. 1—9.
14. Леонов Н. И. Миддендорф А. Ф. (1815—1894) / АН СССР. М.: Наука, 1967. 152 с.
15. Кузьмин П. П. Физические свойства снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 178 с.
16. Снег: Справочник / Под ред. Д. М. Грея, Д. Х. Мэйла. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 751 с.

17. Роль снежного покрова в промерзании грунтов / Н. И. Осокин, В. А. Жидков, Р. С. Самойлов [и др.] // Известия РАН. Серия географическая. 2001. № 4. С. 52—57.
18. Влияние снежного покрова на теплообмен с подстилающей поверхностью / Н. И. Осокин, Р. С. Самойлов, А. В. Сосновский [и др.] // Оледенение Северной Евразии в недавнем прошлом и ближайшем будущем / Под ред. В. М. Котлякова. М.: Наука, 2007. С. 15—54.
19. Котляков В. М., Осокин Н. И., Сосновский А. В. Математическое моделирование тепломассообмена в снежном покрове при таянии // Криосфера Земли. 2004. Т. VIII, № 1. С. 78—83.
20. Арцыбашев С. А. Измерение глубинных температур с помощью термостолбика и несколько наблюдений над зимними температурами Ангары // Метеорологический вестник. 1925. № 2.
21. Арцыбашев С. А., Южаков В. М. Определение коэффициента теплопроводности снега // Известия Биолого-географического научно-исследовательского института при Государственном Иркутском университете. Иркутск, 1931. Т. 5, вып. 4. С. 39—42.
22. Шнейдер П. Инженерные проблемы теплопроводности. М.: Иностранная литература, 1960. 478 с.
23. Власов А. Б. Исследование коэффициента температуропроводности электроизоляционных материалов с помощью тепловизора // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена, 2004. С. 1—10.
24. Соколов А. К. Метод определения температуропроводности и коэффициента теплопроводности по температурам поверхности пластины как полуограниченного тела // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия, 2022. С. 57—65.
25. Zhen-Dong Cui, Peng-Peng He, Wei-Hao Yang. Mechanical properties of a silty clay subjected to freezing — thawing // Cold Regions Science and Technology. 2014. Vol. 98. P. 26—34.
26. Взаимодействия биомолекул: новые экспериментальные подходы и методы / Б. И. Веркин, И. К. Янсон, Л. Ф. Суходуб [и др.]. Киев: Наукова Думка, 1985.

References

1. Borisov V. A., Akinin D. V., Payul A. D. Some issues of snow density change under compressive load. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, no. 3, pp. 77—91. (In Russ.)
2. Tarabanov M. G., Korkin V. D., Sergeev V. F. *Moist Air: Handbook*. Moscow, AVOK, 2004. 50 p. (In Russ.)
3. Uzlov V. A., Shishkov G. I., Shcherbakov V. V. Main physical parameters of snow cover. *Proceedings of R. E. Alekseev NSTU*, 2014, pp. 1—11. (In Russ.)
4. Materials of glaciological studies. International classification for seasonally falling snow (guide to the description of snow thickness and snow cover). Rus. ed. 2012-2. (In Russ.)
5. Richter G. D. *Snow cover, its formation and properties*. Moscow, USSR Academy of Sciences, 1945. 15 p. (In Russ.)
6. Morozov V. S. Calculation of single-layer winter roads for strength. *Innovative Science*, 2015, no. 11-2, pp. 84—88. (In Russ.)
7. Anikin A. A., Barakhtanov L. V., Donato I. O. Physical and mechanical properties of snow as a road surface for vehicles. *Science and Education. Bauman Moscow State Technical University: Electronic Journal*, 2010, no. 10, pp. 1—8. (In Russ.)
8. Pavlov A. V. Some issues of thermal physics of snow cover. *Forest and Field Heat Balance*. Moscow, Institute of Geography of the USSR Academy of Sciences, 1962, pp. 186—201. (In Russ.)
9. Pavlov A. V. *Thermal physics of landscapes*. Novosibirsk, Science, 1979. 286 p. (In Russ.)

10. *International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology*, vol. 1—3. Ed. E. W. Washburn.
11. Chernov P. A. Experimental determination of the thermal conductivity of deep frost. *Ice and Snow*, 2013, no. 3 (123), pp. 71—77. (In Russ.)
12. Abels G. Diurnal temperature variation in snow and the dependence of snow thermal conductivity on density. *Meteorological Bulletin*, 1893, vol. 3. (In Russ.)
13. Stakhovsky I. R. Methods of non-equilibrium physics in modern seismology: on the anniversary of the Institute of the Earth's Physics of the Russian Academy of Sciences. *Space and Time*, 2018, pp. 1—9. (In Russ.)
14. Leonov N. I. *Middendorf A. F. (1815—1894)*. Soviet Academy of Sciences. Moscow, Nauka, 1967. 152 p. (In Russ.)
15. Kuzmin P. P. *Physical properties of snow cover*. Leningrad, Hydrometeorology Publishing House, 1957. 178 p. (In Russ.)
16. *Snow: Handbook*. Ed. D. M. Grey, D. H. Mayl. Leningrad, Hydrometeoizdat, 1986. 751 p. (In Russ.)
17. Osokin N. I., Zhidkov V. A., Samoilov R. S., Sosnovskiy A. B., Chernov P. A. The role of snow cover in ground freezing. *News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*, 2001, no. 4, pp. 52—57. (In Russ.)
18. Osokin N. I., Samoilov P. S., Sosnovsky A. B., Zhidkov V. A., Kitaev L. M., Chernov P. A. The effect of snow cover on heat exchange with the underlying surface. *Freezing of Northern Eurasia in the recent past and near future*. Ed. V. M. Kotlyakov. Moscow, Nauka, 2007, pp. 15—54. (In Russ.)
19. Kotlyakov V. M., Osokin N. I., Sosnovsky A. V. Mathematical modeling of heat and mass exchange in snow cover during thawing. *Cryosphere of the Earth*, 2004, vol. VIII, no. 1, pp. 78—83. (In Russ.)
20. Artsybashev S. A. Measurement of deep temperatures using a heat column and several observations on winter temperatures of the Angara River. *Meteorological Bulletin*, 1925, no. 2. (In Russ.)
21. Artsybashev S. A., Yuzhakov V. M. Determination of the thermal conductivity of snow. *Proceedings of the Biological and Geographical Research Institute at the Irkutsk State University*. Irkutsk, 1931, vol. 5, issue 4, pp. 39—42. (In Russ.)
22. Schneider P. *Engineering problems of heat conduction*. Moscow, Foreign Literature, 1960. 478 p. (In Russ.)
23. Vlasov A. B. Study of the temperature conductivity coefficient of electrical insulation materials using a thermal imager. *Izvestiya of the Russian State Pedagogical University named after A. I. Herzen*, 2004, pp. 1—10. (In Russ.)
24. Sokolov A. K. Method for determining the temperature conductivity and thermal conductivity coefficient based on the surface temperatures of a plate as a semi-infinite body. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Black metallurgy*, 2022, pp. 57—65. (In Russ.)
25. Zhen-Dong Cui, Peng-Peng He, Wei-Hao Yang. Mechanical properties of a silty clay subjected to freezing — thawing. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, vol. 98, pp. 26—34.
26. Verkin B. I., Janson I. K., Sukhodub L. F., Teplytsky A. B. *Interactions of biomolecules: new experimental approaches and methods*. Kyiv, Scientific Thought, 1985. (In Russ.)

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7343

УДК 630.2

Статья

Исследование надёжности модульной системы пожаротушения на базе форвардера Амкодор-2661

Скобцов Игорь Геннадьевич

*доктор технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет
(Российская Федерация), iskobtsov@mail.ru*

Галактионов Олег Николаевич

*доктор технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет
(Российская Федерация), galakt@petrstu.ru*

Сулконен Максим Сергеевич

*магистрант кафедры транспортных и технологических машин и оборудования,
Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация),
maks.sulkonen@list.ru*

Получена: 6 сентября 2023 / Принята: 3 ноября 2023 / Опубликовано: 25 ноября 2023

Аннотация: Лесные пожары были и продолжают оставаться серьёзной мировой глобальной проблемой. В связи с этим проектирование современных машин для борьбы с огнём в лесу является актуальной задачей. Статья посвящена исследованию надёжности модульной системы пожаротушения на базе форвардера на стадии проектирования с использованием методов механики разрушения и теории возможностей. Во введении приведено обоснование и представлен ряд преимуществ использования колёсных форвардеров в качестве базовых машин для установки систем борьбы с лесными пожарами. В первой части статьи представлены основные уравнения силового подхода механики разрушения, связывающие коэффициент интенсивности напряжений с длиной трещиноподобного дефекта. Вязкость разрушения и длина дефекта рассмотрены как гауссовские случайные величины, наибольшее действующее напряжение представлено как нечёткая переменная с неизвестным законом распределения. Аналитические зависимости для оценки надёжности получены как оценка верхних и нижних границ значений вероятности безотказной работы. Реальное значение вероятности данного показателя находится внутри этого интервала. Во второй части статьи представлена оценка вероятности безотказной работы на примере конструкции несущей рамы модульной системы пожаротушения

на базе форвардера Амкодор-2661. Интенсивность напряжений в конструкции определена с применением метода конечных элементов, проведён расчёт для варианта наличия в материале конструкции дефекта в виде краевой трещины. Вычислен интервал значений вероятности безотказной работы, на практике важно знать наибольшее значение вероятности отказа и, соответственно, наименьшую — наиболее обеспеченную — вероятность безотказной работы конструкции. Предложенный метод может быть использован для оценки показателей надёжности элементов конструкций лесных машин при ограниченной статистической информации о нагруженности.

Ключевые слова: механика разрушения; коэффициент интенсивности напряжений; вязкость разрушения; нечёткая переменная

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7343

Article

Research of the reliability of a modular fire extinguishing system based on the forwarder Amkodor-2661

Igor Skobtsov

D. Sc. in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation), iskobtsov@mail.ru

Oleg Galaktionov

D. Sc. in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation), galakt@petrsu.ru

Maxim Sulkonen

student in the master's program of the department of transport and technological machines and equipment, Petrozavodsk State University (Russian Federation), maks.sulkonen@list.ru

Received: 6 September 2023 / Accepted: 3 November 2023 / Published: 25 November 2023

Abstract: Forest fires are still a serious global problem. Therefore, designing of modern forest fire fighting machines is an important problem. This paper deals with the investigation of reliability of forest fire fighting system at the design stage by using fracture mechanics and possibility theory application. Usage justification and some advantages of using wheeled forwarders as basic machines for the installation of forest fire fighting systems are presented in the introduction. The basic fracture mechanics equations linking stress intensity factor with crack-like defect length are presented in the first part of the paper. Fracture toughness and crack-like defect length are viewed as Gaussian random values; maximum applied stress is presented as a fuzzy variable with unknown distribution law. Analytical equations for reliability evaluation are obtained by estimation of upper and lower bounds of reliability function. The real value of this measure is located within this interval. The estimation of reliability function by the example of the supporting frame of a modular firefighting system based on forwarder Amkodor-2661 is presented in the second part of the paper. The stress intensity was determined by the finite element method. The calculation is carried out for the variant of presence of an edge type of crack in material. The interval of reliability function values is calculated. It is important to know the upper value of failure probability and, accordingly, the lower one as the most provided value of reliability function.

The proposed method may be used to assess the reliability of structural elements of forest machines with limited statistical information.

Keywords: fracture mechanics; stress intensity factor; fracture toughness; fuzzy variable

1. Введение

Стихийные бедствия в виде лесных пожаров ежегодно наносят большой ущерб бюджету Республики Карелия. Как показывают статистические данные, с 2012 по 2022 г. пики пожаров приходились на 2013 и 2021 гг., при этом только в 2021 г. площадь, поражённая пожарами, составила более 15 тыс. га [1]. Существует ряд направлений по повышению эффективности борьбы с огнём в лесу [2]. Одним из них является совершенствование технологий и технических средств для тушения лесных пожаров: использование для мониторинга БПЛА и искусственного интеллекта [3], применение дистанционно управляемых лафетных стволов и пожарных роботов, создание негорючих противопожарных барьеров, искусственное вызывание осадков, создание модульных систем пожаротушения на базе существующих лесных машин. В последнем случае следует отметить способ повышения эффективности путём установки модульной системы пожаротушения на базе форвардера — трелёвочной машины манипуляторного типа.

Преимущества в использовании колёсных форвардеров в качестве базовых машин для установки систем борьбы с лесными пожарами могут быть сформулированы следующим образом:

- колёсные форвардеры обладают более высокими скоростями перемещения в условиях лесной пересечённой местности по сравнению с гусеничными трелёвочными тракторами, в свою очередь, это позволяет форвардеру быстрее добраться до места возникновения лесного пожара и приступить к его локализации;
- колёсные форвардеры имеют более высокий тяговый класс по сравнению с гусеничными лесными машинами и, следовательно, бóльшую грузоподъёмность, что позволяет размещать в грузовом отсеке ёмкости для огнетушащего вещества большего объёма, а это повышает эффективность борьбы с огнём;
- наличие гидроманипулятора достаточной грузоподъёмности позволяет оперативно произвести погрузку и монтаж модульного комплекса для пожаротушения в грузовом отсеке форвардера без использования дополнительных погрузочных приспособлений, усложняющих конструкцию грузовой платформы;
- наличие достаточно вместительного грузового отсека позволяет произвести размещение в нём ёмкостей существенно большего объёма, насосной установки, дистанционно управляемого лафетного ствола, входящих в состав мобильного комплекса для тушения лесных пожаров;
- грузовые отсеки большинства форвардеров ведущих производителей имеют сходные конструкции и, таким образом, возникает возможность создания универсальной установки для пожаротушения в виде мобильного комплекса, использование которого возможно как в линейке форвардеров одного производителя, так и форвардеров разных фирм при условии сходной конструкции грузовых отсеков.

Следует отметить, что условия эксплуатации как лесозаготовительных, так и лесохозяйственных машин сильно варьируются и зависят от множества факторов. Например, наличие препятствий (пней, камней, отходов лесозаготовок и др.) вызывает необходимость работы в различных скоростных и нагрузочных режимах. Повышение нагрузки на узлы и детали машин приводит к их отказам [4], а поскольку стоимость специализированной пожарной техники приближается к стоимости лесозаготовительных машин, задача исследования надёжности модульной системы пожаротушения на базе форвардера представляется достаточно актуальной.

На сегодняшний день вероятностно-статистические методы расчёта показателей надёжности с позиций механики разрушения в достаточной степени разработаны [5]. При этом предполагается, что входная статистическая информация является полной, т. е. законы распределения нагрузок, размеров, механических свойств и других характеристик известны и могут быть использованы для проведения проектных расчётов с заданной точностью. Однако зачастую бывает достаточно сложно получить полную статистическую информацию об уровне и характере действующих нагрузок. Таким образом, применение традиционных вероятностных методов при наличии неполной статистической информации может привести к неверному результату. В этом случае для решения задачи могут быть использованы методы теории возможностей [6—8]. Следует отметить, что при ограниченной информации хорошие результаты дают также теория свидетельств Демпстера — Шейфера [9], байесовский подход [10], методы интервальных средних [11]. Существующие теории и особенности их применения подробно проанализированы в фундаментальной работе Л. В. Уткина [8].

2. Материалы и методы

Условие сохранения работоспособного состояния по широко применяемому в механике разрушения силовому подходу Ирвина [12] имеет вид:

$$\tilde{\sigma}_1 Y(\tilde{l}) \sqrt{\pi \tilde{l}} \leq \tilde{K}_{IC}, \quad (1)$$

где $Y(\tilde{l})$ — коэффициент, учитывающий геометрическую форму детали и длину (полудлину) трещины; $\tilde{\sigma}_1$ — максимальное действующее напряжение растяжения; \tilde{l} — длина (полудлина) трещины; \tilde{K}_{IC} — критический коэффициент интенсивности напряжений или вязкость разрушения.

Полагаем $Y(\tilde{l}) = Y = const$, что справедливо для случая, когда длина трещины несоизмеримо меньше размеров детали; \tilde{l} и \tilde{K}_{IC} — случайные величины с известными законами распределения $f_{\tilde{l}}(l)$ и $f_{\tilde{K}_{IC}}(K_{IC})$; $\tilde{\sigma}_1$ — нечёткая переменная с функцией распределения возможностей.

$$\pi_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1) = \exp \left\{ - \left[\frac{(\sigma_1 - a_{\sigma})}{b_{\sigma}} \right]^2 \right\}, \quad (2)$$

$$\text{где } a_{\sigma} = 0.5 \cdot (\sigma_{1\max} + \sigma_{1\min}); \quad b_{\sigma} = \frac{0.5 \cdot (\sigma_{1\max} - \sigma_{1\min})}{\sqrt{-\ln \alpha}}, \quad \alpha \in [0, 1].$$

Параметры $\sigma_{1\max}$ и $\sigma_{1\min}$ определяются из экспериментально полученных в ходе эксплуатации данных о процессе нагружения детали. Очевидно, что такая информация носит ограниченный характер, и поэтому переменная $\tilde{\sigma}_I$ рассматривается как нечёткая.

В теории возможностей пара распределений (верхняя и нижняя функции распределения вероятностей) иногда называется р-блоком (p-box) [8]. «Точное» распределение $F_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1)$ находится внутри блока [7]:

$$\underline{F}_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1) \leq F_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1) \leq \overline{F}_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1), \quad (3)$$

где $\underline{F}_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1)$ и $\overline{F}_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1)$ — соответственно нижняя и верхняя функции распределения вероятностей.

Функция распределения возможностей связана с р-блоком следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \underline{F}_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1) &= \begin{cases} 0, & \sigma_1 \leq a_{\sigma} \\ 1 - \pi_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1), & \sigma_1 > a_{\sigma} \end{cases} \\ \overline{F}_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1) &= \begin{cases} \pi_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1), & \sigma_1 \leq a_{\sigma} \\ 1, & \sigma_1 > a_{\sigma} \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

Необходимо оценить вероятность возникновения отказа $Q = \{ Y\sigma_1\sqrt{\pi l} > K_{IC} \}$, при описании $\tilde{\sigma}_I$ посредством теории возможностей, а \tilde{l} и \tilde{K}_{IC} — методами теории вероятностей. В нашем случае для $\tilde{\sigma}_I$ — нечёткой, а \tilde{l} и \tilde{K}_{IC} — случайных, искомая вероятность запишется:

$$P\{Y\sigma_1\sqrt{\pi l} > \tilde{K}_{IC}\} = \iiint_{Y\sigma_1\sqrt{\pi l} > K_{IC}} f_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) f_{\tilde{l}}(l) f_{\tilde{K}_{IC}}(K_{IC}) d\sigma_1 dl dK_{IC}, \quad (5)$$

где $f_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1)$, $f_{\tilde{l}}(l)$, $f_{\tilde{K}_{IC}}(K_{IC})$ — плотности распределения соответствующих случайных величин $\tilde{\sigma}_1$, \tilde{l} и \tilde{K}_{IC} .

Подставив пределы интегрирования, получим следующее выражение:

$$P\{Y\sigma_1\sqrt{\pi l} > \tilde{K}_{IC}\} = \int_0^{\infty} \int_0^{Y\sigma_1\sqrt{\pi l}} \int_0^{\infty} f_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) f_{\tilde{l}}(l) f_{\tilde{K}_{IC}}(K_{IC}) d\sigma_1 dl dK_{IC} = \quad (6)$$

$$= \int_0^\infty \int_0^\infty f_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) f_{\tilde{l}}(l) \left[\int_0^{Y\sigma_1\sqrt{\pi l}} f_{\tilde{K}_{IC}}(K_{IC}) dK_{IC} \right] d\sigma_1 dl =$$

$$= \int_0^\infty \int_0^\infty f_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) f_{\tilde{l}}(l) \cdot F_{\tilde{K}_{IC}}(Y\sigma_1\sqrt{\pi l}) d\sigma_1 dl,$$

где $F_{\tilde{K}_{IC}}(Y\sigma_1\sqrt{\pi l}) = \int_0^{Y\sigma_1\sqrt{\pi l}} f_{\tilde{K}_{IC}}(K_{IC}) dK_{IC}$ — функция распределения вероятностей случайной величины K_{IC} .

Полагаем, что $\tilde{\sigma}_1$, \tilde{l} и \tilde{K}_{IC} являются независимыми. Нижнее и верхнее значения вероятности отказа с позиций механики разрушения определяются с использованием зависимостей (4) и пределов интегрирования (рисунок 1) по формулам

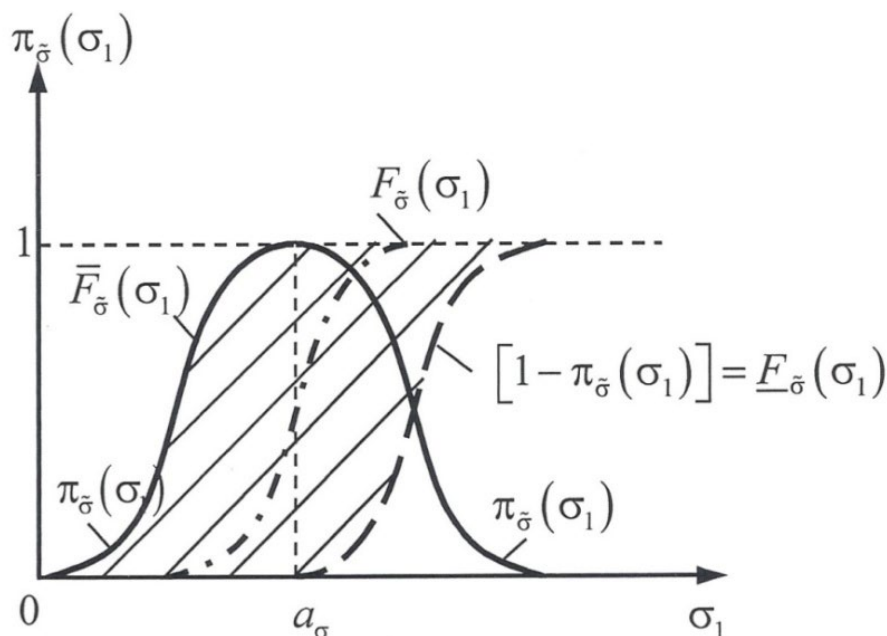


Рисунок 1. Верхняя и нижняя функции распределения вероятностей

Figure 1. Upper and lower probability distribution functions

$$\underline{Q} = \int_{a_\sigma}^\infty \int_0^\infty f_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) \left[f_{\tilde{l}}(l) \cdot F_{\tilde{K}_{IC}}(Y\sigma_1\sqrt{\pi l}) dl \right] d\sigma_1$$

$$\overline{Q} = \int_0^{a_\sigma} \int_0^\infty f_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) \left[f_{\tilde{l}}(l) \cdot F_{\tilde{K}_{IC}}(Y\sigma_1\sqrt{\pi l}) dl \right] d\sigma_1$$

или

$$\left. \begin{aligned} \underline{Q} &= \int_{a_\sigma}^{\infty} \underline{f}_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) \left[\int_0^{\infty} f_{\tilde{l}}(l) \cdot F_{\tilde{K}_{lc}}(Y\sigma_1\sqrt{\pi l}) dl \right] d\sigma_1 \\ \overline{Q} &= \int_0^{a_\sigma} \overline{f}_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) \left[\int_0^{\infty} f_{\tilde{l}}(l) \cdot F_{\tilde{K}_{lc}}(Y\sigma_1\sqrt{\pi l}) dl \right] d\sigma_1 \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Здесь $\underline{f}_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) = \frac{dF_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1)}{d\sigma_1}$, $\overline{f}_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) = \frac{d\overline{F}_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1)}{d\sigma_1}$ — нижняя и верхняя плотности распределения; $F_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1)$, $\overline{F}_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1)$ — нижняя и верхняя функции распределения,

$$\underline{f}_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) = \frac{d(1 - \pi_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1))}{d\sigma_1} = 2 \frac{\sigma_1 - a_\sigma}{b_\sigma} \cdot \frac{1}{b_\sigma} e^{-\left(\frac{\sigma_1 - a_\sigma}{b_\sigma}\right)^2}, \quad (8)$$

$$\overline{f}_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) = \frac{d\pi_{\tilde{\sigma}}(\sigma_1)}{d\sigma_1} = -2 \left(\frac{\sigma_1 - a_\sigma}{b_\sigma^2} \right) \cdot e^{-\left(\frac{\sigma_1 - a_\sigma}{b_\sigma}\right)^2}, \quad (9)$$

$$\underline{f}_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) = 0, \text{ если } \sigma_1 < a_\sigma, \text{ и } \overline{f}_{\tilde{\sigma}_1}(\sigma_1) = 0, \text{ если } \sigma_1 > a_\sigma. \quad (10)$$

Законы распределения \tilde{l} и \tilde{K}_{lc} полагаем гауссовскими с известными математическими ожиданиями $m_l, m_{K_{lc}}$ и дисперсиями $S_l^2, S_{K_{lc}}^2$, плотность распределения длины трещины

$$f_{\tilde{l}}(l) = \frac{1}{S_l \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(l - m_l)^2}{2S_l^2}}, \quad (11)$$

функция распределения вязкости разрушения

$$F_{\tilde{K}_{lc}}(Y\sigma_1\sqrt{\pi l}) = \int_0^{Y\sigma_1\sqrt{\pi l}} \frac{1}{S_{K_{lc}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(K_{lc} - m_{K_{lc}})^2}{2S_{K_{lc}}^2}} dK_{lc}. \quad (12)$$

Оценка интервала вероятности отказа $[\underline{Q}, \overline{Q}]$ осуществляется по формулам (7) с учётом выражений (8)—(12). Нижнее \underline{R} и верхнее \overline{R} значения вероятности безотказной работы определяются: $\underline{R} = 1 - \overline{Q}$ и $\overline{R} = 1 - \underline{Q}$. Реальное значение вероятности безотказной работы находится внутри интервала $[\underline{R}, \overline{R}]$.

3. Результаты

Проведём оценку вероятности безотказной работы конструкции несущей рамы (платформы) модульной системы пожаротушения на базе форвардера Амкодор-2661.

Компоновочная схема установки для пожаротушения представлена на рисунках 2, 3. Все комплектующие мобильного комплекса (мотопомпа «Гейзер» МП 10/70, лафетный ствол ЛСД-С20У, ёмкости для огнетушащей жидкости МП3000ФК2_1П100 объёмом 3150 л каждая) размещены на несущей раме — платформе 1.

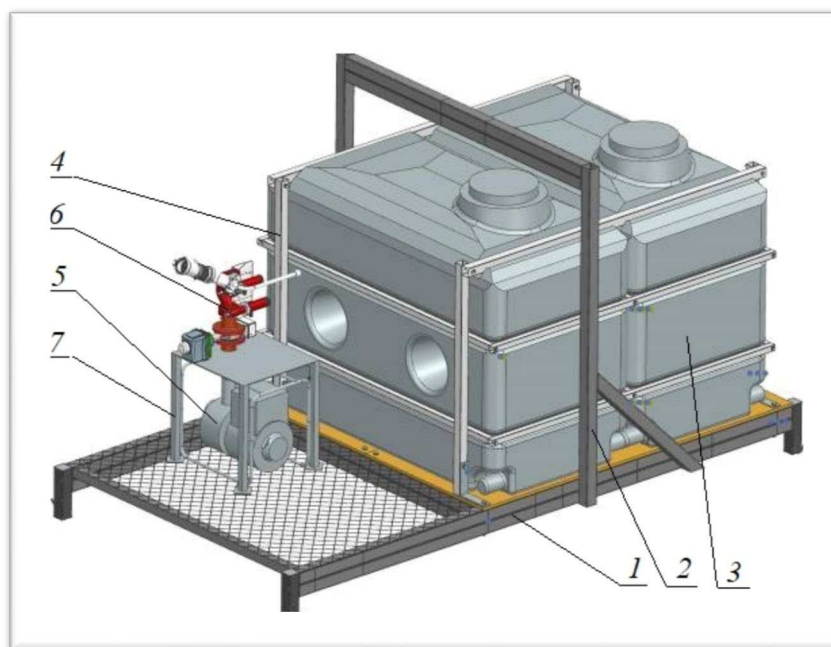


Рисунок 2. Компоновочная схема модульной системы пожаротушения (вариант с двумя ёмкостями для огнетушащего вещества)

Figure 2. Layout diagram of a modular fire extinguishing system (option with two containers for a fire extinguishing agent)

Платформа 1 представляет собой сварную конструкцию из стандартного профиля стальной трубы квадратного сечения и листовых материалов. Для осуществления погрузки мобильного комплекса гидроманипулятором в грузовой отсек форвардера платформа 1 оснащена верхней балкой 2, которая также служит в качестве опоры гидроманипулятора форвардера после погрузки мобильного комплекса в грузовой отсек. Ёмкости для огнетушащего вещества 3 размещены на передней части платформы 1 и зафиксированы на ней при помощи обвязки 4, составленной из труб стального профиля квадратного сечения. В задней части платформы 1 размещены мотопомпа 5, гидравлически связанная с лафетным стволом 6 и ёмкостями 3 при помощи трубопроводной арматуры (на схеме не показана). Лафетный ствол 6 с системой управления размещён над мотопомпой 5 на опоре 7, установленной на перфорированном листе несущей рамы и представляющей сварную конструкцию из стандартного профиля стальной трубы квадратного сечения и листовых материалов.

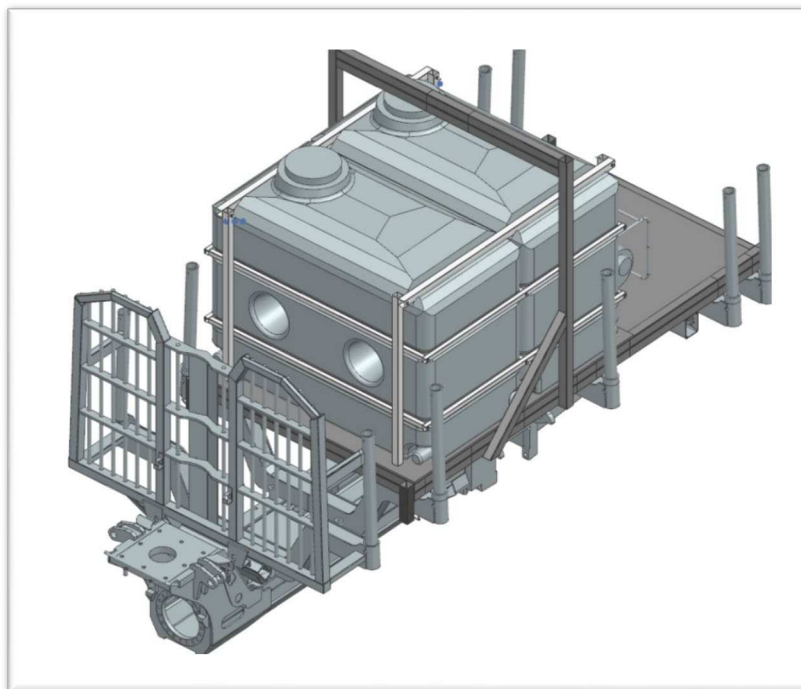


Рисунок 3. Компоновочная схема установки, размещённой в грузовом отсеке форвардера

Figure 3. Layout diagram of a modular system loaded into the forwarder's cargo compartment

При проектировании установки силовой расчёт платформы проводился для следующих вариантов нагружения:

- вариант погрузки установки для пожаротушения с незаполненными ёмкостями в грузовой отсек гидроманипулятором;
- вариант размещения установки с заполненными ёмкостями в грузовом отсеке форвардера. Ниже представим результаты расчёта по второму — наиболее нагруженному — варианту.

Для проведения силового расчёта в пакете прикладных программ «Зенит» была построена КЭ-модель платформы. Платформа представлена в виде стержневой конструкции, состоящей из полых труб квадратного сечения. Величина нагрузки, действующей на платформу со стороны ёмкостей для огнетушащего вещества, принята равной $G = 63$ кН и равномерно распределённой между узлами модели, соответствующими зоне расположения ёмкостей.

КЭ-модель платформы с интенсивностью действующих напряжений для варианта сечения стержней $40 \times 40 \times 2$ мм представлена на рисунке 4. При нагружении по данному варианту наибольшие напряжения действуют в поперечных балках, лежащих в передней части платформы, величина их составляет 656 МПа. Таким образом, параметры функции распределения возможностей принимаем: $a_\sigma = 656$ МПа, $b_\sigma = 65,6$ МПа [8].

Материал платформы — сталь 15ХСНД с вязкостью разрушения $K_{IC} = 1310 \text{ Н/мм}^{3/2}$ [13]. Принимаем математическое ожидание вязкости разрушения $m_{K_{IC}} = 1310 \text{ Н/мм}^{3/2}$ и среднее квадратическое отклонение (с. к. о.) $S_{K_{IC}} = 0,1 m_{K_{IC}}$ [14].

В качестве трещиноподобного дефекта принимаем краевую трещину с математическим ожиданием $m_l = 0,5 \text{ мм}$ и средним квадратическим отклонением (с. к. о.) $S_l = 0,1 m_l$ [14].

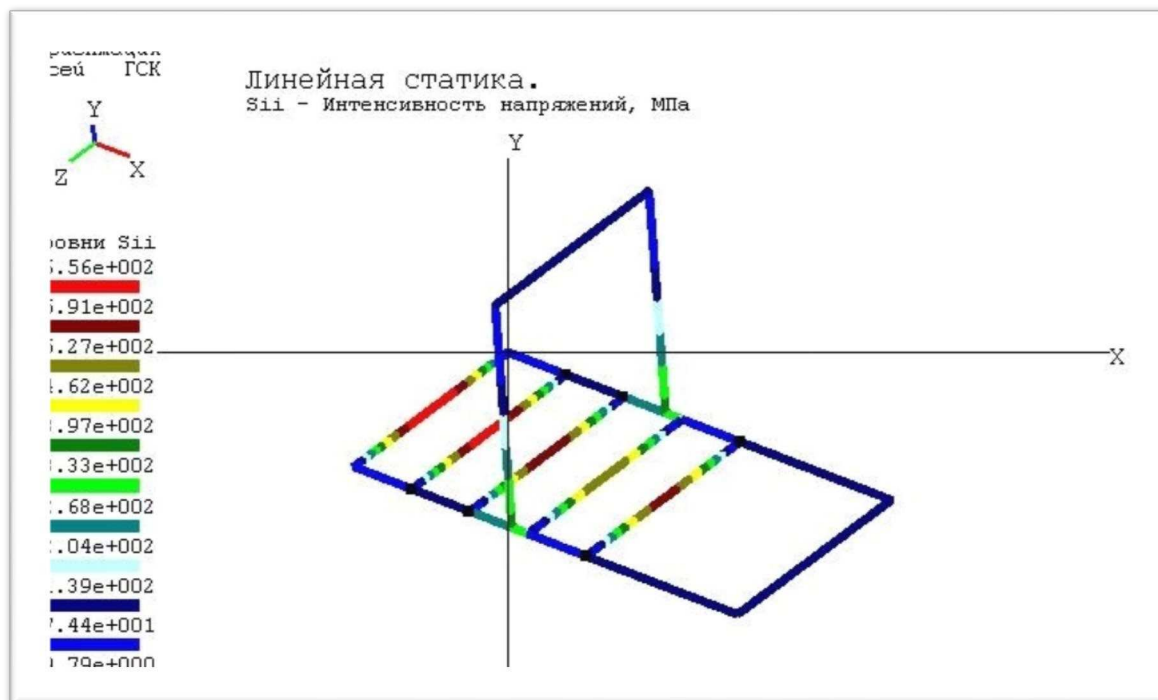


Рисунок 4. КЭ-модель платформы с интенсивностью действующих напряжений (вариант с заполнением ёмкостей огнетушащим веществом)

Figure 4. Finite-element model of platform with calculated stress intensity (containers are filled with a fire extinguishing agent)

Оценку вероятности безотказной работы платформы при наличии в её материале трещиноподобных дефектов проведём при помощи программы, реализованной в среде MathCAD и представленной на рисунке 5.

По результатам расчётов, значение вероятности безотказной работы находится в интервале $[0,981; 0,999]$. Следует отметить, что на практике важно знать наибольшее значение вероятности отказа и, соответственно, наименьшую — наиболее обеспеченную — вероятность безотказной работы конструкции.

Математическое ожидание длины трещины: $l := 0.5 \text{ мм}$ - математическое ожидание длины трещины; $Sl := 0.1 \cdot ml$ - с.к.о. трещины

Математическое ожидание вязкости разрушения: $k1c := 1310 \text{ Н/мм}^{3/2}$ - математическое ожидание вязкости разрушения; $Sk1c := 0.1 \cdot Mk1c$ - с.к.о. вязкости разрушения

плотность распределения длины трещины

$$f_l(l) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot Sl}} \cdot e^{-\frac{(l - ml)^2}{2 Sl^2}}$$

коэффициент интенсивности напряжений

$$k(\sigma, l) := Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot l}$$

нижняя плотность распределения

$$f_n(\sigma) := \begin{cases} 2 \cdot \left(\frac{\sigma - as}{bs^2} \right) \cdot e^{-\left(\frac{\sigma - as}{bs} \right)^2} & \text{if } \sigma \geq as \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

верхняя плотность распределения

$$f_v(\sigma) := \begin{cases} -2 \cdot \left(\frac{\sigma - as}{bs^2} \right) \cdot e^{-\left(\frac{\sigma - as}{bs} \right)^2} & \text{if } \sigma \leq as \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

функция распределения вязкости разрушения

$$Fk1c(\sigma, l) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot Sk1c}} \cdot \int_0^{k(\sigma, l)} \frac{-(k1c - Mk1c)^2}{e^{2 Sk1c^2}} dk1c$$

нижняя граница вероятности отказа

$$Q_n := \int_0^{as} f_v(\sigma) \cdot \left(\int_0^{\infty} f_l(l) \cdot Fk1c(\sigma, l) dl \right) d\sigma$$

$Q_n = 5.122 \times 10^{-4}$

верхняя граница вероятности отказа

$$Q_v := \int_{as}^{\infty} f_n(\sigma) \cdot \left(\int_0^{\infty} f_l(l) \cdot Fk1c(\sigma, l) dl \right) d\sigma$$

$Q_v = 0.019$

нижняя граница RPD $D_n := 1 - Q_n$ $D_n = 0.999$

верхняя граница RPD $D_v := 1 - Q_v$ $D_v = 0.981$

Рисунок 5. Пример расчёта вероятности безотказной работы в программе MathCAD

Figure 5. The example of reliability function estimation in MathCAD program

4. Обсуждение и заключение

Совершенствование вероятностно-статистических методов механики разрушения, позволяющих произвести учёт влияния трещиноподобных дефектов на уровень надёжности деталей машин и элементов конструкций, является актуальной задачей. В то же время в ряде случаев нет достаточного количества статистической информации, т. е. имеет место неполнота информации, что определяет направление дальнейших исследований.

Разработан метод оценки вероятности безотказной работы деталей машин и элементов конструкций при воздействии предельной нагрузки с использованием силовых критериев механики разрушения при случайных и нечётких параметрах. В качестве нечёткой переменной, описываемой функцией распределения возможностей, рекомендовано рассматривать действующее напряжение. Размер трещины и вязкость разрушения рассматривались как случайные величины с известными законами распределения. Приведён пример расчёта вероятности безотказной работы элементов конструкции платформы, входящей в состав модульной системы пожаротушения на базе форвардера.

Благодарности

Исследования, описанные в данной работе, были проведены в рамках проекта «Разработка мобильного комплекса на базе форвардера для тушения лесных пожаров», поддержанного в рамках Программы поддержки НИОКР студентов, аспирантов и лиц, имеющих учёную степень, обеспечивающих значительный вклад в инновационное развитие отраслей экономики и социальной сферы Республики Карелия, в 2023 году, финансируемой Правительством Республики Карелия (договор № 3-Г22 от 29.12.2022 между ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» и Фондом венчурных инвестиций Республики Карелия).

Список литературы

1. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2021 году / Под ред. А. Н. Громцева. Петрозаводск, 2022. 263 с.
2. Газизов А. М., Янгирова Р. Р. Современные методы борьбы с лесными пожарами // Нефтегазовое дело. 2021. № 1. С. 25—39.
3. Вычерова Н. Р., Будевич Е. А., Беляев А. Э. Разработка системы раннего обнаружения лесных пожаров с использованием беспилотных летательных аппаратов и искусственного интеллекта // Resources and Technology. 2022. № 19 (4). С. 85—101.
4. Skobtsov I. G., Shilovsky V. N., Dobrynina O. L. Estimating the reliability of forestry machine elements with possibility theory application // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 954. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/954/1/012071>. Text. Image: electronic.
5. Pitukhin A. V. Optimal design problems using fracture mechanics methods // Computers and Structures. 1997. Vol. 65 (4). P. 621—624.
6. Dubois D., Prade H. Possibility theory: an approach to computerized processing of uncertainty. New York: Plenum Press, 1988. 288 p.
7. Zadeh L. A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8. P. 338—353.
8. Уткин Л. В. Анализ риска и принятие решений при неполной информации. СПб.: Наука, 2007. 404 с.
9. Dempster A. P. Upper and lower probabilities induced by multivalued mapping // Annales of Mathematical Statistics. 1967. Vol. 38 (2). P. 325—339.
10. Berger J. O. Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis. New York: Springer-Verlag, 1985. 617 p.
11. Tonnon F., Bernardini A., Mammino A. Reliability analysis of rock mass response by means of random set theory // Reliability Engineering and System Safety. 2000. Vol. 70 (3). P. 263—282.
12. Irwin G. R. Fracture dynamics // Fracturing of metals. 1948. ASM publ. P. 147—166.
13. Саврук М. П. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами: Справ. пособие // Механика разрушения и прочность материалов: В 4 т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. Киев: Наукова думка, 1988. Т. 2. 620 с.
14. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчёты деталей машин на прочность. М.: Машиностроение, 1975. 480 с.

References

1. Gromtsev A. N. *State environmental report of the Republic of Karelia in 2021*. Petrozavodsk, 2022. 263 p. (In Russ.)
2. Gazizov A. M., Yangirova R. R. Modern methods of fighting forest fires. *Oil and gas business*, 2021, no. 1, pp. 25—39. (In Russ.)
3. Vycherova N. R., Budevich E. A., Belyaev A. E. Development of a forest fire early detection system using unmanned aerial vehicles and artificial intelligence. *Resources and Technology*, 2022, no. 19 (4), pp. 85—101. (In Russ.)
4. Skobtsov I. G., Shilovsky V. N., Dobrynina O. L. Estimating the reliability of forestry machine elements with possibility theory application. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 954. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/954/1/012071>. Text. Image: electronic.
5. Pitukhin A. V. Optimal design problems using fracture mechanics methods. *Computers and Structures*, 1997, vol. 65 (4), pp. 621—624.
6. Dubois D., Prade H. *Possibility theory: an approach to computerized processing of uncertainty*. New York, Plenum Press, 1988. 288 p.
7. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965, vol. 8, pp. 338—353.
8. Utkin L. V. *Analysis and Decision Making with Incomplete Information*. Saint-Petersburg, Nauka, 2007. 404 p. (In Russ.)
9. Dempster A. P. Upper and lower probabilities induced by multivalued mapping. *Annales of Mathematical Statistics*, 1967, vol. 38 (2), pp. 325—339.
10. Berger J. O. *Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis*. New York, Springer-Verlag, 1985. 617 p.
11. Tonnon F., Bernardini A., Mammino A. Reliability analysis of rock mass response by means of random set theory. *Reliability Engineering and System Safety*, 2000, vol. 70 (3), pp. 263—282.
12. Irwin G. R. Fracture dynamics. *Fracturing of metals*, 1948, ASM publ, pp. 147—166.
13. Savruk M. P. Stress Intensity Factors in Solids with Cracks. *Fracture Mechanics and Strength of Materials: Resource book in 4 volumes*. By V. V. Panasyuk edition. Kiev, Naukova dumka, 1988, vol. 2. 620 p. (In Russ.)
14. Serensen S. V., Kogaev V. P., Shneyderovich R. M. *Load-carrying capacity and machine element strength analysis*. Moscow, Mashinostroenie, 1975. 480 p. (In Russ.)

УДК 630*

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7283

Обзор

Анализ технических и технологических решений очистки лесосек от порубочных остатков

Трушевский Павел Владимирович

директор ООО «Сибирский биоуголь» (Российская Федерация), pavel.trushevskii@mail.ru

Куницкая Ольга Анатольевна

доктор технических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), ola.ola07@mail.ru

Должиков Илья Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Российская Федерация), idolzhikov222@mail.ru

Макуев Валентин Анатольевич

доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (Мытищинский филиал) (Российская Федерация), makuev@mgul.ac.ru

Ревяко Сергей Иванович

кандидат технических наук, доцент, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт, Донской государственный аграрный университет (Российская Федерация), revyako77@mail.ru

Григорьева Ольга Ивановна

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Российская Федерация), grigoreva_o@list.ru

Получена: 15 августа 2023 / Принята: 30 ноября 2023 / Опубликовано: 7 декабря 2023

Аннотация: Очистка лесосек от порубочных остатков является важной и необходимой завершающей операцией лесосечных работ. При этом у лесозаготовителей она считается излишне затратной, и достаточно часто её выполняют «из-под палки», особенно если исполнители данной операции в дальнейшем не занимаются работами по лесовосстановлению. Не менее часто представители лесничеств, на землях которых производятся лесосечные работы,

уделяют качеству выполнения данной операции чрезмерное внимание. В результате в ряде регионов штрафы, выписываемые лесозаготовителям за некачественную очистку лесосек, являются обычным явлением. Это связано не только с плохой организацией или качеством работ на данной операции, но и с различным трактованием лесничими и руководством лесозаготовителей требований нормативной документации. В данной обзорной статье выполнено обоснование возможности использования концепции «бережливого производства» к операции очистки лесосек с точки зрения всех этапов лесозаготовительного производства (лесосечных работ, транспорта леса, лесоскладских работ, лесовосстановительных работ). Отмечены перспективы дальнейшего эффективного использования порубочных остатков, в т. ч. в качестве биотоплива. Рассмотрены способы сбора порубочных остатков, при проведении лесосечных работ в зависимости от их технологии и системы используемых машин.

Ключевые слова: очистка лесосек; порубочные остатки; «бережливое производство»; лесозаготовительное производство; биотопливо из порубочных остатков

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7283

Revy

Analysis of technical and technological solutions for clearing cutting areas from felling residues

Pavel Trushevsky

Director of Siberian Biougol LLC (Russian Federation), pavel.trushevskii@mail.ru

Olga Kunitskaya

D. Sc. in engineering, professor, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), ola.ola07@mail.ru

Ilya Dolzhikov

Ph. D. in engineering, associate professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Russian Federation), idolzhikov222@mail.ru

Valentin Makuev

D. Sc. in engineering, professor, Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi Branch) (Russian Federation), makuev@mgul.ac.ru

Sergey Revyako

Ph. D. in engineering, associate professor, Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute, Don State Agrarian University (Russian Federation), revyako77@mail.ru

Olga Grigoreva

Ph. D. in agriculture, associate professor, Saint Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov (Russian Federation), grigoreva_o@list.ru

Received: 15 August 2023 / Accepted: 30 November 2023 / Published: 7 December 2023

Abstract: Clearing of cutting areas from felling residues is an important and necessary final logging operation. However, this work is considered unnecessarily costly by loggers and quite often is performed poorly, especially if the loggers are not engaged in future reforestation. No less often, forest officers pay special attention to the quality of this operation, and as a result fines to loggers for poor-quality clearing of cutting areas are common enough occurrence in a number of regions. This is due not only to the poor organization or quality of work on this operation, but also to the different interpretation of regulatory documentation requirements by foresters and forestry management. This review article justifies the possibility of “lean production” concept application to

logging sites clearing operation that includes all stages of logging production: logging operations, forest transport, timber storage, and reforestation. Prospects for further effective use of felling residues, for example, as biofuel, are noted. The authors consider tasks and methods of felling residues collection and accumulation depending on the timber harvesting machines and operations, and machines and technologies for collecting felling residues.

Keywords: clearing of the cutting area; felling residues; lean production; logging production; biofuels from felling residues

1. Введение

Достаточно давно в теории менеджмента (теории управления качеством) появилась концепция «бережливое производство» [1]. В литературных источниках можно встретить достаточно много определений этого понятия. Например: «Это направление менеджмента, обеспечивающее конкурентоспособность предприятия за счёт выпуска продукции (оказания услуг) в количестве, необходимом заказчику, с высоким качеством, минимальными затратами ресурсов и низкой себестоимостью» или: «Это концепция рационализации бизнес-процессов, направленная на его ускорение и сглаживание путём выявления и исключения процессов, которые не добавляют ценности продукту и являющихся причиной возникновения так называемых “скрытых потерь” деятельности компании» [2—5].

Если попробовать применить первое определение «бережливого производства» к лесосечным работам, то можно указать следующий момент: классически себестоимость продукции любого производства состоит из затрат на сырьё, заработную плату, расходы на эксплуатацию машин и оборудования (включая ремонт и амортизацию), расходы на энергию, затрачиваемую на обработку и перемещение сырья, полуфабрикатов, готовой продукции. Также отметим, что государство как собственник лесных ресурсов продаёт их лесозаготовителям на корню в хлыстах, без коры. Это означает, что кора и крона не имеют начальной стоимости как классической составляющей себестоимости продукции. В настоящее время в России и мире заготовленная древесина вывозится, в основном, в виде сортиментов и, значительно реже, в виде хлыстов. Но так или иначе порубочные остатки — кроновая часть заготовленных деревьев, вместе с тонкомерными стволами, обломками стволов, откомлёвками и т. д., остаётся в лесу в подавляющем большинстве случаев, если рассматривать практику работы российских лесозаготовительных предприятий. При этом, являясь совершенно бесплатным сырьевым ресурсом, порубочные остатки могут служить для достижения таких целей «бережливого производства» (первое определение), как «минимальные затраты ресурсов и низкая себестоимость».

Если попробовать применить второе определение «бережливого производства» к лесосечным работам, то можно указать следующий момент: порубочные остатки, разбросанные по вырубке или даже уложенные в кучи (штабели) у лесовозной дороги или на вырубке, представляют собой пожарную и фитопатологическую опасность [6]. Срок их перегнивания и, соответственно, образования удобрения почвенного слоя вырубки крайне велик (не считая ассимиляционного аппарата и тонких веток). Следовательно, порубочные остатки вполне могут быть отнесены к «возможным причинам возникновения “скрытых потерь” деятельности компании». Ведь при возникновении пожара или вспышки размножения насекомых — вредителей леса на борьбу с этими явлениями придётся затратить весьма немалые силы и средства.

Кроме этого, порубочные остатки, очевидно, являются причиной возникновения «скрытых потерь» работы лесозаготовительного предприятия, когда речь заходит

о лесовосстановительных работах, особенно при искусственном или комбинированном лесовосстановлении [7]. Следовательно, уборка и эффективная переработка порубочных остатков полностью соответствуют принципам «бережливого производства при проведении лесосечных работ».

2. Материалы и методы

Отмеченные во введении замечания по поводу прямого отношения вопроса эффективности сбора и переработки порубочных остатков к концепции «бережливого производства в области лесосечных работ» вполне можно расширить до применения к концепции «бережливого производства в области лесозаготовительного производства».

Как известно, лесосечные работы являются одной из четырёх фаз лесозаготовительного производства, и их обычно принято считать первой фазой [8]. Также в лесозаготовительное производство входят: транспорт заготовленной древесины (транспорт леса); лесоскладские работы; лесовосстановительные работы [9].

Если обратить внимание на транспорт леса и учитывать необходимость с точки зрения концепции «бережливого производства» сбора, вывозки и эффективной переработки порубочных остатков, а также если не принимать во внимание вариант использования порубочных остатков для укрепления временных транспортных путей — лесовозных усов, трелёвочных волоков и технологических коридоров, то при транспортировке данного вида лесоматериалов крайне желательно значительное увеличение коэффициента полндревесности воза (Δ) [10], [11].

Как известно, автолесовозы обладают далеко не лучшим коэффициентом тары даже при перевозке круглых лесоматериалов в виде сортиментов, при $\Delta \approx 0,7$, или даже бруса, при $\Delta \approx 1,0$. Перевозка разнородных по размеру порубочных остатков насыпью в контейнеровозе даст, в лучшем случае, $\Delta \approx 0,25$. При этом, согласно справочным данным, даже перевозка щепы насыпью позволит получить $\Delta = 0,35—0,4$, а при условии уплотнения насыпной щепы в контейнеровозе возможно получить $\Delta = 0,42—0,5$ [12—14]. Это уже позволяет получить удвоение загрузки автолесовоза-контейнеровоза в 2 раза. Если же из измельчённых порубочных остатков на верхнем складе или на лесном терминале произвести столь востребованную продукцию, как прессованное биотопливо в виде топливных брикетов стандарта RUF, имеющих, благодаря своей геометрической форме, очень плотную укладку, то можно получить воз порубочных остатков (переработанных) с $\Delta \approx 1,0$, точнее с $\Delta = 0,92$ [15].

Следовательно, применительно к транспорту леса перевозка переработанных порубочных остатков даёт существенный положительный эффект, а с точки зрения концепции «бережливого производства», которая заключается в существенном снижении себестоимости транспортировки древесины за счёт повышения коэффициента полндревесности воза, примерно в 4 раза, если говорить о прессованном биотопливе в виде топливных брикетов стандарта RUF, или в 2 раза, если говорить об уплотнённой щепе.

Лесоскладские работы от использования порубочных остатков в энергетических целях, наряду с отходами их основного производства, могут дать снижение стоимости отопления зданий и сооружений основного и вспомогательного производств, объектов социальной инфраструктуры населённых пунктов, в которых они расположены, а также возможна прибыль от реализации данного вида топлива или получаемой из него тепловой энергии [16], [17].

Важность данного тезиса можно проиллюстрировать следующим: 10.02.2023 г. на выездном заседании по развитию лесного комплекса в Архангельске Президент РФ В. В. Путин обратил внимание на производство биотоплива российскими лесопромышленными компаниями и дал поручения Минпромторгу задуматься о развитии тепловой биоэнергетики.

После данного мероприятия (16.02.2023 г.) на региональном телевидении Архангельской области выступал министр природных ресурсов и лесного комплекса Игорь Мураев, который говорил о региональных перспективах биотопливного производства из измельчённой спрессованной древесины. Конечно, в большей степени его выступление касалось пеллет, но общая тенденция в его выступлении просматривается очень хорошо. По его словам, в регионе производилось около 600 тыс. т биотоплива из измельчённой спрессованной древесины, в основном пеллет. Более 90 % из них уходили на экспорт, в страны Европы, рынки которых оказались сейчас закрыты. Высококачественные пеллеты, сделанные на дорогом, высокопроизводительном пеллетном оборудовании, не востребованы на внутреннем рынке, а пеллетные заводы оказались на грани остановки. Это привело к затариванию деревоперерабатывающих заводов области отходами основного производства. При этом продукция немногочисленных брикетных цехов и заводов пользуется устойчивым спросом и расширяет экспортные горизонты за счёт увеличения спроса в дружественных странах Азии и Африки.

Для существенного увеличения спроса на пеллеты в Российской Федерации необходимы огромные инвестиции. К примеру, чтобы использовать внутри страны 600 тыс. т пеллет, необходимо 155 котельных общей мощностью 420 МВт. Это около 17 млрд руб. инвестиций только в переоборудование местных котельных. Каждая котельная должна иметь мощность порядка 2,7 МВт, а в РФ только два завода производят такого типа и мощности котельные агрегаты — в Коврове и Челябинске. Хотя, конечно, мощности котельных агрегатов в российском ЖКХ колеблются в пределах 1,0—10,0 МВт. То есть перевод российских котельных на пеллеты — дело весьма нескорого будущего. При этом при достаточно незначительной разности в калорийности, по сравнению с пеллетами, для перевода котельных с угля на топливные брикеты никаких существенных модернизаций не требуется. В подтверждение этого факта можно привести следующее: «В 2015—2022 гг. восемь из 15 котельных в Вологодской области были переведены с угля на древесные брикеты с минимальными затратами на модернизацию: в топках заменили колосники, а также организовали складские помещения для хранения запаса брикетов. При этом получили

возможность оперативного возврата к использованию угля при минимальных изменениях — достаточно вернуть на место изначальные колосники» [18]. Брикеты могут быть основным или вспомогательным видом топлива, в любом случае позволяя экономически и экологически эффективно использовать не востребованную древесину из порубочных остатков [19—22], энергетический потенциал которых в России оценивается экспертами в районе 25—28 млн т эквивалента нефти, что составляет около 3,54 % от годового потребления нашей страны в тоннах эквивалента нефти. Это, с одной стороны, не очень много, но, с другой стороны, и не очень мало, если учесть тот факт, что ресурсы легкой доступной нефти достаточно быстро заканчиваются, добыча «тяжёлой» нефти — дело и дорогое, и экологически вредное.

И что также весьма примечательно, компаниями нефтегазового сектора экономики также очень востребованы технологии и технические решения по энергетическому использованию порубочных остатков, которые образуются у них при проведении рубок леса для геологоразведки [23], [24]. Ведь в настоящее время они отапливают свои вахтовые помещения соляркой, а её стоимость, с учётом необходимости доставки на значительные расстояния в труднодоступную местность, может превышать и 100 руб. за литр.

Важность рассматриваемого вопроса подтверждается ещё и тем, что он поднимается регулярно на совещаниях самого высокого уровня. Например, на прошедшем весной 2023 г. заседании Экспертно-консультативного совета по лесному комплексу при Комитете Совета Федерации по аграрно-продовольственной политике и природопользованию с участием представителей Минстроя и ЖКХ, Министерства природных ресурсов и экологии, Минпромторга, Министерства экономического развития, Рослесхоза, Торгово-промышленной палаты, отмечалось, что стоимость одной котельной на пеллетах доходит до 40 млн руб., а стоимость 1 МВт получаемой на такой котельной энергии примерно в 2 раза дороже, чем на ископаемом топливе. Это подтверждает утверждение многих специалистов отрасли о том, что «зелёная» энергия на пеллетах в большей части политика, а не экономика [25], [26]. Когда власти Польши отказались выделять субсидии частным домовладениям и организациям, получавшим тепловую энергию из древесных пеллет, эта «зелёная» энергетика буквально за полгода вышла из «моды», а ведь это достаточно широкий сегмент бизнеса — не только производство и транспортировка пеллет, но и производство котлов и вспомогательного оборудования котельных. И пока руководство Евросоюза не указало властям Польши на необходимость возобновления выделения субсидий, данный вид «зелёной» энергетике не только не развивался в Польше, но и значительно сократился, особенно с учётом того, что тогда полякам был доступен дешёвый трубопроводный газ из Российской Федерации.

Отдельным вопросом в рассматриваемой проблемной области является расчистка и использование древесины с горельников [27—30]. Например, этот вопрос поднимался на выездном заседании Совета по вопросам развития лесного комплекса Российской Федерации при Совете Федерации Федерального Собрания России, которое состоялось

во Владивостоке 13.07.2023 г. Согласно опубликованной Комитетом по лесу общероссийской общественной организации «Деловая Россия» стенограмме данного заседания, Председатель Правительства Республики Саха (Якутия) А. В. Тарасенко указал, что «...одна из самых главных проблем республики — это проблема горелого леса. Огромнейшая проблема, и её надо решать, надо чистить лес. Мы просим, чтобы продумали программу поддержки по формированию закупки промышленного оборудования на переработку этой древесины. ...В Якутии огромные площади горелого леса, и его надо убирать».

Данный вопрос технически стоит отдельно от рассматриваемых в данной статье решений, поскольку оценивать запас горелой древесины, в зависимости от первоначальных таксационных характеристик сгоревшего насаждения и характеристик пожара, нужно отдельно. Разработка горельников также является отдельной технической задачей, со своими проблемами и техники безопасности, и работы машин. Как известно, физико-механические свойства древесины, повреждённой пожаром, достаточно сильно меняются, и в большом диапазоне. Кроме этого, торрефицированная пожаром древесина содержит большое количество очень твёрдых абразивных частиц, что требует специальных воздушных фильтров для лесных машин и бензиномоторных пил [31], [32], а это, скорее всего, будет приводить к повышенному износу ножей рубительных машин и прессового оборудования, в случае, если оптимальным вариантом переработки такой древесины будет выбрано производство из неё топливных брикетов. Но также вопрос эффективной расчистки горельников, включая оптимальное использование повреждённой пожаром древесины, затрагивает следующую составляющую лесозаготовительного производства — лесовосстановительные работы.

В области лесовосстановительных работ, за счёт качественной очистки лесосек от порубочных остатков, можно не только существенно упростить основной технологический процесс подготовки почвы под посадку или последующее естественное лесовосстановление [33], [34], но ещё из измельчённых порубочных остатков прямо на месте потребления возможно успешно делать мульчу, которая будет предохранять почву от пересыхания, а также сдерживать прорастание сорной травянистой растительности [35].

Резюмируя, можно отметить, что сбор и эффективное использование (переработка, утилизация) порубочных остатков, очевидно, соответствуют концепции «бережливого производства» на всех фазах лесозаготовительного производства, а следовательно, способствуют продвижению данной концепции в лесном комплексе в целом.

3. Результаты

Как уже было отмечено выше, к порубочным остаткам принято относить кроновую часть заготовленных деревьев (сучья, ветви, ассимиляционный аппарат, вершины), обломки сломавшихся стволов, откомлёвки, оставшиеся на лесосеке после проведения лесосечных работ [36—38].

Порубочные остатки необходимо убирать с территории лесосеки, согласно требованиям пункта 12 (подпункт к) Правил заготовки древесины и особенностей заготовки древесины в лесничествах, указанных в статье 23 Лесного кодекса Российской Федерации, утверждённых приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 01.12.2020 г. № 993.

Уборка порубочных остатков с территории лесосеки, иногда называемая лесозаготовителями «подбор», преследует решение трёх основных задач [39].

- Во-первых, противопожарная. В большинстве случаев именно она считается наиболее важной, т. к. вероятность перехода низового пожара на неочищенной от порубочных остатков вырубке в верховой на порядок выше, чем на очищенной. Да и возможность возникновения самого лесного пожара не очищенной вырубке значительно выше [40]. Именно высохшие на солнце порубочные остатки являются прекрасным лесным горючим материалом, для которого достаточно буквально искры, часто природного характера, чтобы сработала «лесная пожарная триада» и начался лесной пожар — неконтролируемое распространение огня в лесу. Особенно этот аспект важен для регионов с резко континентальным климатом, для которого характерны низкая влажность воздуха и высокие летние температуры, вкуче со значительной инсоляцией.

Полезно также помнить, что более половины лесов Российской Федерации располагаются на вечной мерзлоте (леса криолитозоны) [41], [42]. Для них характерна крайне низкая активность почвенной биоты [43], [44], разлагающей порубочные остатки в гумус, поэтому на таких вырубках неубранные порубочные остатки могут много лет ждать своего пожара.

- Во-вторых, фитопатологическая. Эта задача ставится во главу угла в регионах, подверженных вспышкам насекомых-вредителей, для которых крупные порубочные остатки и пни могут служить и кормовой базой, и маточным хозяйством — для заселения их личинками будущих поколений [45]. В этом смысле, помимо порубочных остатков, опасность представляют также и пни, которые в ряде случаев приходится окоривать, во избежание вспышек размножения насекомых-вредителей. Хотя с этим вполне помогает и лесная фауна, например, медведи с удовольствием окоривают пни и поедают найденных там личинок.

- В-третьих, содействие последующему естественному лесовосстановлению. Очевидно, что когда вся поверхность вырубки забросана ковром значительной толщины порубочными остатками, то пробиться сквозь них семенам от семенных деревьев крайне сложно. Впрочем, и при искусственном лесовосстановлении, с каждым годом получающем всё большее

распространение в Российской Федерации, сплошной ковёр порубочных остатков будет мешать посадке сеянцев (саженцев), как с открытой, так и с закрытой корневой системой [7], [46].

В ряде литературных источников к очистке вырубок в целях обеспечения последующих работ по искусственному лесовосстановлению относят также корчёвку или понижение пней [47—49], но данный процесс в настоящей статье рассматриваться не будет. Хотя с точки зрения дальнейшего использования в качестве биотоплива выкорчёванные пни успешно используют в странах Европы. Например, в Финляндии и Швеции достаточно часто можно встретить на обочинах дорог сохнувшие на солнце кучи пней, которые в дальнейшем собирают, отряхивают от земли и вывозят в котельные или измельчают в топливную щепу при помощи мобильных рубительных машин, оснащённых колунами, прямо на месте.

Для очистки вырубок от порубочных остатков рекомендованы следующие способы, перечисленные в приказе Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 27.06.2016 г. № 367 «Об утверждении видов лесосечных работ, порядка и последовательности их проведения, формы технологической карты лесосечных работ, формы акта осмотра лесосеки и порядка осмотра лесосеки»:

- Во-первых, «укладкой порубочных остатков на волок с целью их укрепления и предохранения почвы от сильного уплотнения и повреждения при трелёвке». Данный вариант является одним из наиболее распространённых в Российской Федерации, особенно при проведении лесосечных работ на лесосеках со слабой несущей способностью почвогрунтов (III и IV категории) в тёплый период года. Во многом его распространение связано с тем, что более половины территории лесного фонда нашей страны находится именно на почвогрунтах III и IV категории. Обычно такой вариант очистки от порубочных остатков производится одновременно с проведением основных лесосечных работ, когда сразу после валки дерева, его очистки от сучьев и обрезки вершины кроновая часть укладывается на пасечный трелёвочный волок. Иногда часть порубочных остатков перемещают на магистральный трелёвочный волок, особенно на места с максимальной грузовой работой [50—52]. Но отметим, что хотя большая часть порубочных остатков при таком варианте очистки лесосеки будет собрана и уложена на волок во время проведения основных лесосечных работ, после их окончания всё равно придётся делать доочистку в бесснежный период, поскольку часть кроны отвалится при падении дерева и его подтаскивании в зону обработки, если работает харвестер [53].

Такой вариант очистки от порубочных остатков имеет два существенных достоинства — позволяет укреплять ездovou поверхность трелёвочных волоков, что значительно снижает интенсивность колееобразования, степень повреждения почвогрунтов, нагрузки в трансмиссии лесных машин и расход топлива [54], [55], а также разрушать порубочные остатки (вдавливать их в почвогрунт, что делает их пожаробезопасными, неинтересными насекомым-вредителям) и создаёт условия для их более быстрого перегнивания, удобряя тем самым лесную почву и улучшая

лесорастительные условия для следующей сукцессии леса (фото 1). Здесь также полезно упомянуть тот факт, что около 70% всех зольных веществ, находящихся в дереве, находится именно в кроновой части [56], и её перегнивание эффективно обеспечивает лесную почву необходимыми неорганическими веществами.

При использовании способа очистки укладкой на волоке надо учитывать, что данный вариант необходимо исполнять именно во время производства основных работ, поскольку для качественного вдавливания порубочных остатков в ездовую поверхность волока потребуется значительное количество рейсов по ним лесных машин. И если это делать по окончании основных работ, то придётся вхолостую гонять трелёвочную технику, а это затраты времени и средств.

При трелёвке хлыстов в полупогруженном положении иногда наблюдается смещение уложенных на волок порубочных остатков волочащейся частью пачки. Но обычно они не смещаются с трассы волока.



Фото 1. Раздавленные и вмятые в почву порубочные остатки на пасечном трелёвочном волоке (Красноярский край)

Photo 1. Crushed and squeezed into the soil felling residues on the skidding line (Krasnoyarsk Territory)

- Во-вторых «сбором порубочных остатков в кучи и валы с последующим сжиганием их в пожаробезопасный период». Перед подробным рассмотрением данного способа очистки вырубок от порубочных остатков отметим разницу между терминами «кучи» и «валы». Этот и последующие способы очистки лесосек выполняются после завершения основных лесосечных работ, в отличие от предыдущего.

При выборочных и сплошных рубках с сохранением равномерно расположенного подроста хозяйственно ценных пород порубочные остатки на пасаках приходится собирать вручную. Это малопроизводительный и достаточно тяжёлый физически ручной труд. Когда сбор порубочных остатков в определённые места производится вручную, их укладывают в кучи [57].

После сплошных рубок без сохранения подроста хозяйственно ценных пород порубочные остатки можно собирать при помощи специальных грабельных подборщиков, представляющих собой, как правило, навесное оборудование к трелёвочному трактору. В этом случае подборщик укладывает порубочные остатки в валы по заранее размеченным вешками линиям [58].

В пожаробезопасный период эти кучи (или валы) сжигаются по одной, от периферии к центру лесосеки. Это далеко не оптимальный вариант по следующим соображениям: прежде всего, после такой утилизации порубочных остатков возникают очаги сильного термического поражения почвы (как кострища в лесу), на которых потом довольно долго ничего не растёт [59]. Кроме этого, такой вариант требует определённых трудозатрат работников, занимающихся сжиганием, и достаточно приличных затрат горючего, чтобы кучи или валы полностью сжечь. Достаточно часто для сжигания куч порубочных остатков используют отработанные автомобильные покрышки, которые позволяют поддерживать огонь до полного сжигания порубочных остатков. Для доставки покрышек на вырубку часто используют автолесовозы, на коники которых, при холостом рейсе за древесиной, их одевают. Хотя основные задачи очистки вырубки от порубочных остатков решаются, в результате они становятся не пожароопасными, неинтересными насекомым-вредителям, а зола даже способствует удобрению лесной почвы. Но экологический ущерб от сжигания автомобильных покрышек в данном случае необходимо учитывать, также как и расход керосина (бензина).

Согласно требованиям постановления Правительства Российской Федерации от 07.10.2020 г. № 1614 «Об утверждении Правил пожарной безопасности в лесах», после завершения сжигания порубочных остатков они тщательно засыпаются землёй или заливаются водой до полного прекращения тления. Укладка порубочных остатков длиной не более 2 м в кучи или валы шириной не более 3 м должна быть на расстоянии не менее 10 м от прилегающих лесных насаждений. Расстояние между валами должно быть не менее 20 м.

- В-третьих, «сбором порубочных остатков в кучи и валы с оставлением их на месте для перегнивания и для подкормки диких животных в зимний период». В данном варианте

кучи или валы получают при тех же условиях и теми же способами, что и в предыдущем варианте. Только кучи собирают на пнях, вниз укладывают по правилам крупные порубочные остатки, а сверху засыпают слоем древесной мелочи от 0,7 м. Конечно, при сборе порубочных остатков в валы грабельным подборщиком эти рекомендации выдержать невозможно.

Данный вариант позволяет не тратить силы и средства на сжигание, не приводит к термическим поражениям почвы, но не гарантирует от участия куч или валов в лесном пожаре, если он возникнет, и от заселения насекомыми-вредителями.

■ В-четвёртых, «разбрасыванием измельчённых порубочных остатков в целях улучшения лесорастительных условий». Надо отметить, что такой вариант очистки вырубок от порубочных остатков в отечественной и в зарубежной практике рассматривается несколько по-разному. В Российской Федерации под измельчением понимают распиливание крупных порубочных остатков на длину до 1—1,5 м, а за рубежом, например в Европе, — измельчение при помощи прицепной или самоходной рубительной машины, или мульчером, или ротоватором. Очевидно, что иностранный вариант такого способа значительно затратнее, но и значительно эффективнее. Щепка достаточно быстро перегниёт, изначально не подходит для заселения насекомыми-вредителями, не мешает расти следующему поколению леса. Метровые порубочные остатки могут заселяться насекомыми-вредителями, будут мешать древесной поросли и перегниют довольно не скоро, особенно в лесах криолитозоны, а значит, будут являться лесным горючим материалом [60], [61].

■ В-пятых, «укладкой и оставлением на перегнивание порубочных остатков на месте рубки». Надо отметить, что это наиболее спорный пункт упомянутого выше приказа Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 367, впервые появившийся вместе с выходом этого документа. По сути, его можно трактовать как «...или можно совсем ничего не делать с валяющимися на вырубке порубочными остатками...», поскольку данный вариант не предусматривает выполнения с порубочными остатками каких-либо транспортных или обрабатывающих операций. Конечно, с учётом нулевых затрат на очистку вырубок от порубочных остатков по данному варианту он наиболее интересен лесозаготовителям. Но он также максимально не подходит для качественного ведения лесного хозяйства, поскольку в этом случае рубка имеет большую пожароопасность, фитопатологическую опасность и затрудняет лесовосстановление. В практике работы лесозаготовительных предприятий удалённых регионов нашей страны данный способ очистки вырубок достаточно распространён, но в центральной России и на Северо-Западе он вызывает много нареканий от сотрудников лесничеств, приводит к штрафам «за недоочистку лесосек» и судебным разбирательствам. Хотя, очевидно, что если такой способ прописан в нормативном документе и зафиксирован в утверждённой технологической карте на разработку лесосеки, то формально прав лесозаготовитель, а не лесничество, при всей неправильности использования такого способа очистки рубки [62], [63].

Кроме этого, согласно уже упомянутому постановлению Правительства Российской Федерации от 07.10.2020 г. № 1614 «Об утверждении Правил пожарной безопасности в лесах»: «Лесосеки в хвойных равнинных лесах на сухих почвах с оставленными на перегнивание порубочными остатками должны отделяться противопожарной минерализованной полосой шириной не менее 1,4 м, а лесосеки площадью свыше 25 га должны быть, кроме того, разделены противопожарными минерализованными полосами указанной ширины на участки, не превышающие 25 га». Разумеется, создание минерализованных полос достаточно трудозатратное мероприятие, требующее использования специальной техники, которую придётся доставлять на вырубку, а значит, затрачивать и время, и средства.

■ В-шестых, «вывозом порубочных остатков в места их дальнейшей переработки». В ряде случаев, особенно при проведении лесосечных работ в почвогрунтах с хорошей несущей способностью (I и II категории) в теплое время года, или при проведении лесосечных работ в зимний период, особенно при их концентрации, например, на верхнем складе, этот вариант наиболее предпочтителен. Часто порубочные остатки используют не только для укрепления пасечных и магистральных трелёвочных волоков [64], но и для укрепления ездовой поверхности лесовозных усов, которые, по определению, являются временными транспортными путями, сроком службы на разработку лесосеки [65], [66]. Поэтому порубочные остатки вполне могут прослужить весь необходимый период эксплуатации лесовозного уса, при этом существенно удешевив стоимость его строительства.

При небольшой дальности вывозки порубочные остатки можно измельчать при помощи уже упомянутых прицепных или самоходных рубительных машин на топливную щепу и снабжать ею близлежащие населённые пункты. Во времена СССР в средних и крупных лесопромхозах достаточно эффективно работали цеха ширпотреба, перерабатывавшие в т. ч. и часть крупных порубочных остатков [67].

В уже упомянутом приказе Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 367 также отмечено, что «указанные выше способы очистки мест рубок при необходимости могут применяться комбинированно». Например, часть порубочных остатков может направляться на укрепление ездовой поверхности трелёвочных волоков, при необходимости, а часть — на строительство лесовозных усов или иной вариант использования вне лесосеки [68].

Заканчивая анализ задач и способов очистки вырубок от порубочных остатков, отметим, что, согласно упомянутому приказу Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 367, в нашей стране «сжигание порубочных остатков сплошным палом не допускается». Хотя сплошной пал достаточно эффективно используется во многих странах мира. В отличие от сжигания порубочных остатков в кучах или валах, очевидно, он может производиться только в пожароопасный период, поскольку всю вырубку керосином не польёшь, и в этом самый большой недостаток данного способа. С другой

стороны, сплошной пал фактически представляет собой искусственный беглый низовой пожар, в результате которого не образуются очаги сильного термического поражения почвы, порубочные остатки не сгорают полностью, а только обугливаются, после чего значительно быстрее перегнивают, удобряя почву, становятся не пожароопасны и не интересны насекомым-вредителям [69].

3.1. Концентрация порубочных остатков

В зависимости от технологии проведения лесосечных работ порубочные остатки могут концентрироваться, во-первых, на верхнем складе (у уса лесовозной дороги) — при трелёвке деревьев и их очистке от сучьев и, чаще всего, раскряжёвке на складе. Такой вариант в Российской Федерации менее распространён и относится к так называемой «канадской технологии заготовки древесины», при которой используется следующая система машин: валочно-пакетирующая машина (ВПМ) + трактор с пачковым захватом (скиддер) + процессор (сучкорезно-раскряжёвочная машина) [70]. В принципе по такому же варианту может работать одномашинный комплекс — валочно-трелёвочно-процессорная машина (ВТПМ), но в настоящее время такие машины в нашей стране не используются [71]. С одной стороны, это наиболее высокопроизводительный вариант системы машин и технологического процесса (не считая ВТПМ), с другой стороны, как уже было отмечено, он не очень распространён в нашей стране и применяется, в основном, на ряде крупных и средних лесозаготовительных предприятий Сибири [72], [73].

Конечно, неправильно утверждать, что при трелёвке деревьев на пасаках не останется порубочных остатков совсем. При валке дерева, особенно при трелёвке зимой в мороз, часть кроны отпадёт, и её впоследствии придётся убрать. В этой ситуации наиболее часто используемый вариант — весь объём порубочных остатков остаётся на пасаках при работе по наиболее распространённой в настоящее время в Российской Федерации скандинавской технологии заготовки древесины [53], [74]. При машинной заготовке наиболее распространённым вариантом заготовки по такой технологии является пара: харвестер (валочно-сучкорезно-раскряжёвочная машина) + форвардер (сортиментоподборщик), также такой технологический процесс могут выполнять одномашинные комплексы — харвардер или форвестер [71], [74], [75]. Но харвардеры в Российской Федерации в настоящее время не используются, а форвестеров (Ponsse Dual) до начала санкционной войны с нашей страной было закуплено всего около 30 шт. В настоящее время в Российской Федерации распространена механизированная (при помощи бензиномоторных пил) скандинавская заготовка (под форвардер). Впрочем, так или иначе, при скандинавской заготовке древесины весь объём порубочных остатков находится на пасаках. В ряде случаев значительная часть кроны при работе харвестера укладывается на пасечный трелёвочный волок и впоследствии приминается форвардером, но достаточно много случаев, когда порубочные остатки равномерно распределены по всей площади лесосеки [76]. К примеру, фото 2 сделано на вырубке в Иркутской области (2022 г.) после сплошной рубки спелых и перестойных

насаждений сосны машинным комплексом харвестер + форвардер с оставлением семенных деревьев. Как видно из фото 2, вырубка сплошным ковром покрыта порубочными остатками, часть из которых достаточно крупные — откомлёвки и верхние части ствола диаметром менее 16 см.

Надо отметить, что оставление верхних частей ствола диаметром менее 16 см на лесосеке в виде порубочных остатков характерно для многих многолесных районов Российской Федерации, это, например, Иркутская область, Красноярский край, Республика Саха (Якутия). Все эти районы объединяет отсутствие деревоперерабатывающих предприятий, использующих балансовую древесину (плитные заводы, целлюлозно-бумажные комбинаты (ЦБК) и т. д.), к которой и относится верхняя, тонкая, часть ствола [77], [78]. Помня о том, что со времён СССР в нашей стране не построили ни одного нового ЦБК, отметим, что при больших расстояниях вывозки эти вполне качественные балансы переходят в разряд низкотоварной древесины, себестоимость заготовки и транспортировки которой выше, нежели её продажная стоимость у потребителя [79]. В ряде случаев невостребованные вершинные (балансовые) сортименты оставляются лесозаготовителями на погрузочной площадке, на которой при разгрузке форвардеров формируют отдельный штабель (фото 3). В дальнейшем этот штабель сжигается, в пожароопасный период иногда закапывается или остаётся перегнивать.



Фото 2. Вырубка в Иркутской области

Photo 2. Logging site in the Irkutsk region

Но такой, можно сказать идеальный, вариант концентрации крупных порубочных остатков на площадке у дороги является, скорее, исключением. На большей части изученных вырубках крупные порубочные остатки и часть кроны валяются вперемешку (фото 4).



Фото 3. Штабель вершинных обрезков на погрузочном пункте в Республике Саха (Якутия)

Photo 3. A stack of tree tops at a loading point in the Republic of Sakha (Yakutia)

Согласно литературным источникам, объём кроновой части дерева, в процентах от объёма ствола, составляет 3—12 %. Более точные данные приведены в таблице 1.

Понятно, что на каждой конкретной лесосеке процентное отношение кроны относительно объёма стволовой древесины будет отличаться в ту или иную сторону, даже при одинаковом породном составе, в зависимости от возраста, размеров, бонитета, полноты насаждений. Например, согласно данным литературных источников, процент кроны у наиболее распространённых лиственных деревьев (берёза, осина) при диаметрах ствола на высоте груди 10—20 см составляет ± 15 %, а при увеличении диаметра ствола до 30 см — уже только 3—5 %. У сосны и ели при тех же размерах ствола приводятся следующие данные: при диаметрах ствола на высоте груди 10—20 см составляет ± 9 %, а при увеличении диаметра ствола до 30 см — уже только 4—5 % [80].

С одной стороны, основная масса порубочных остатков, подлежащих последующей уборке, образуется при сплошных рубках спелых и перестойных насаждений, ранее

называемых рубками главного пользования лесом, или финальной рубкой, или даже лесовозобновительной рубкой. Диаметры стволов на высоте груди в этих условиях достаточно сильно варьируются, но при этом нигде не учитывается широко распространённый в настоящее время вид рубки с вывозом получаемых сортиментов только от 14—16 см в диаметре и оставлением вершинной части на лесосеке. Следовательно, как минимум, можно ориентироваться на большие уровни процентного соотношения кроны к объёму ствола (по таблице 1).



Фото 4. Вырубка, покрытая вперемешку крупными (стволовыми) порубочными остатками и частями кроны (Красноярский край)

Photo 4. Felling site, covered with large (stem) felling residues and parts of the crown (Krasnoyarsk Territory)

Таблица 1. Объём сучьев, пней и корней у различных пород деревьев [80]

Table 1. The volume of branches, stumps and roots of various tree species [80]

Древесная порода	Объём коры (%) от объёма ствола	Объём сучьев и ветвей (%) от объёма ствола	Объём пней и корней (%) от объёма стволов в полных спелых древостоях	
			Пней	Пней и корней
Сосна	10—17	4—10	8—12	18—25
Ель	7—5	5—12	10—12	25—30
Дуб	17—20	6—15	10—12	22—35
Берёза	—	3—8	8—10	22—24
Ольха	—	5—12	8—10	22—24
Осина	13—15	5—12	8—10	22—24

3.2. Машины и технологии для сбора порубочных остатков

При канадской технологии лесосечных работ, предусматривающей трелёвку деревьев, обрезку сучьев и раскряжёвку на верхнем складе, большая часть кроны, а также и неостребованные вершинные части древесных стволов (см. фото 3) остаются на площадке у лесовозной дороги.

При получении на пасеке и последующей трелёвке хлыстов, особенно при скандинавской технологии лесозаготовок, порубочные остатки, включая части стволовой древесины (откомлёвки и неостребованные вершинные резы), остаются на пасеках. В таблице 2 приведена классификация порубочных остатков.

Не считая рассмотренного выше варианта очистки лесосек путём оставления порубочных остатков на месте или их измельчения на месте мульчером или ротоватором, во всех остальных случаях сбор порубочных остатков представляет собой транспортную технологическую операцию, при которой изменяется месторасположение предмета труда, но не производится его обработка.

Порубочные остатки представляют собой распределённые по площади ультрамалообъёмные лесоматериалы, собирать которые при машинном способе лучше всего широкозахватным технологическим оборудованием.

Если кратко рассмотреть историю развития транспортно-технологических систем для сбора порубочных остатков, то рассмотрение этого вопроса хорошо начать с классификационной схемы на рисунке 1. Как видно из данной схемы, по конструкции транспортно-технологические системы для сбора порубочных остатков подразделяются на следующие виды с [81]:

- грабельным или челюстным собирающим органом;
- навесным или прицепным оборудованием;
- механическим или гидравлическим приводом собирающего органа;

- передним или задним (по отношению к трактору) расположением собирающего органа;
- базированием на трелёвочных тракторах или тракторах общего назначения.

Таблица 2. Классификация порубочных остатков [80]

Table 2. Classification of felling residues [80]

Наименование	Определение, ГОСТ, ОСТ, ТУ
Сучья	Отходящие от ствола одревесневшие боковые побеги дерева толщиной у основания более 3 см (ГОСТ 17462-84)
Ветки	Отходящие от сучьев малоодревесневшие или недревесневшие боковые побеги дерева толщиной у основания 3 см и менее (ГОСТ 17462-84)
Древесная зелень	Хвоя, листья, почки и недревесневшие побеги древесно-кустарниковой растительности толщиной у основания менее 1 см (ГОСТ 21769-84)
Откомлёвки	Короткие обрезки комлевой части ствола, отрезаемые для выравнивания комлевого торца или для выборки протяжённости ствола, содержащего внутреннюю гниль
Тонкомер*	Вершинные части ствола диаметром до 14 см
Хворост**	Тонкие стволы деревьев толщиной в комле до 4 см

Примечание. * Понятие тонкомер сформулировано на одноимённом общепринятом понятии, относящемся к сортиментам, с учётом уже вышедшего из обхода понятия «подтоварник». В действительности, как показывает практика, диаметр тонкомера, оставленного на лесосеке, может достигать и 16 см. ** Больше относится к расчистке линейных объектов и других площадей.

Как было отмечено выше, после выборочных рубок и после сплошных рубок, с сохранением равномерно распределённого по площади подроста главных древесных пород, сбор порубочных остатков производится вручную. При этом производительность на этой операции крайне небольшая. В исследовании [82] приведены следующие данные по возможной производительности на ручной очистке вырубок от порубочных остатков, в зависимости от вида трелюемых лесоматериалов, сезона проведения лесосечных работ и состава насаждения (таблица 3).

Первые попытки механизации ручного сбора порубочных остатков заключались в том, что к трактору крепили специальную сетку из стальных канатов. Порубочные остатки укладывались на неё высотой до 1,7 м. Затем сетка заворачивалась при помощи лебёдки трактора и производилась её транспортировка. При разгрузке один конец сетки отцепляли; сетка разворачивалась при движении трактора, и порубочные остатки оказывались на земле [83].

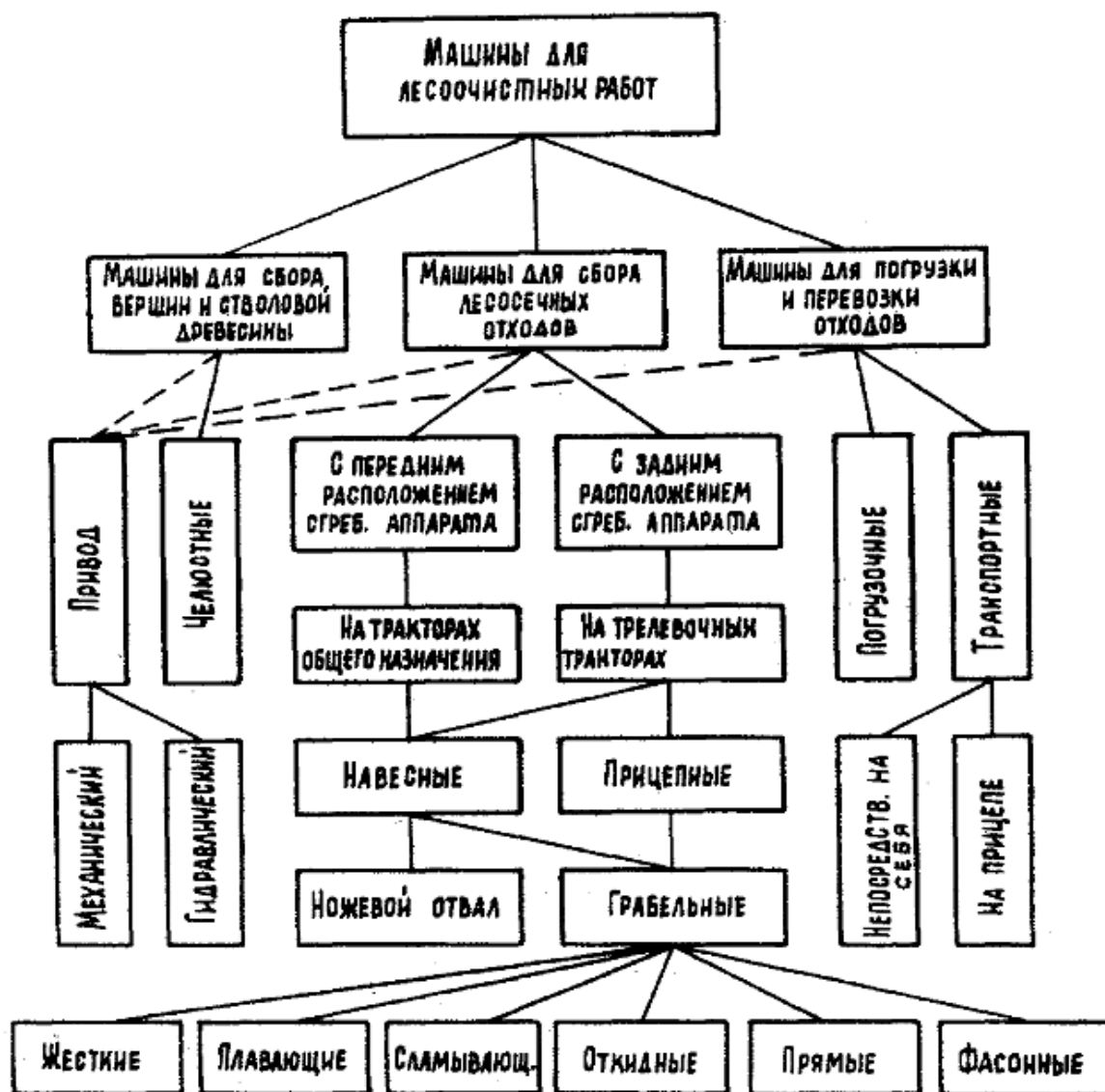


Рисунок 1. Классификация транспортно-технологических систем для очистки лесосек [84]

Figure 1. Classification of transport and technological systems for cutting areas clearing [84]

Известно, что при сборе равномерно разбросанных по вырубке порубочных остатков, после сплошной рубки без сохранения подроста, как, например, рассмотренная выше вырубка в Иркутской области, на которой произрастал практически чистый сосновый древостой, или, например, после рубки лиственного древостоя лучше всего использовать грабельный подборщик [81], представляющий собой трелёвочный трактор со специальным навесным технологическим оборудованием (фото 5).

Таблица 3. Нормы выработки на очистке вырубок от порубочных остатков вручную, га за чел.-день (смена 7 ч) [82]

Table 3. Production standards for cutting site clearing from felling residues manually, ha per person-day (7 hour shift) [82]

Насаждения	Трелёвка			
	деревьев		хлыстов	
	зимой	летом	зимой	летом
Елово-пихтовые	0,18	0,22	0,2	0,24
Сосновые	0,30	0,35	0,4	0,45
Лиственные	0,2	0,25	0,25	0,26
Смешанные	0,19	0,23	0,23	0,26



Фото 5. Грабельный подборщик ПСГ-2,4/ПСГ-2,9 на базе гусеничного трактора ТДТ-55А

Photo 5. The PSG-2,4/PSG-2,9 site-prep rake, based on the TDT-55A crawler tractor

Прообразом представленного на фото 5 грабельного подборщика был подборщик траловый (рисунок 2), технологическое оборудование которого было выполнено в виде трала с двумя тетивами, натягиваемыми между двумя тракторами и снабжёнными собирателями, которые были изготовлены из отрезков канатов, образующих трёхгранную призму. При работе устройства передняя приводная тетива, изготовленная из круглозвенной цепи, совершала вращательное движение по ходу трактора, таким образом, цепь, катящаяся по всему фронту между тракторами, преодолевала препятствия и подбирала порубочные остатки, пропуская их через себя. Отходы накапливались на несущих органах трала.

Но широкого применения это устройств не получило. Во многом это было связано со следующими причинами: для натягивания троса необходимо два трактора и сложна конструкция самого троса [84].

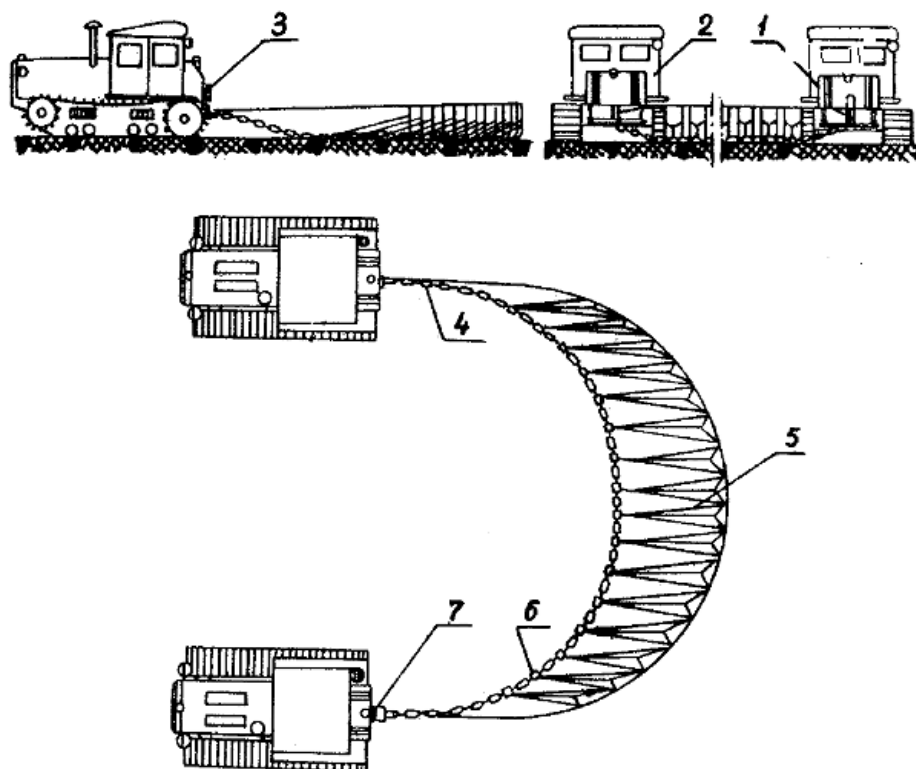


Рисунок 2. Траловый подборщик для сбора порубочных остатков [84]: 1, 2 — тракторы; 3 — реверсивная коробка лебёдки; 4 — приводная передняя тетива; 5 — канатные отрезки верхней тетивы; 6 — подшипниковое кольцо; 7 — холостой вертлюг

Figure 2. Trawling pick-up for collecting felling residues [84]: 1, 2 — tractors; 3 — reversible winch box; 4 — drive front string; 5 — rope segments of the upper string; 6 — bearing ring; 7 — idle swivel

В работе [82] приведены следующие данные по возможной производительности на очистке вырубок от порубочных остатков грабельным подборщиком, в зависимости от запаса леса на гектар и размеров вырубки (таблица 4).

Как видно при сравнении таблиц 3 и 4, во-первых, производительность машинной очистки вырубок от порубочных остатков не зависит от состава насаждений, вида трелюемых лесоматериалов и сезона проведения лесосечных работ; во-вторых, минимальная норма выработки (для самых неблагоприятных условий) на машинной очистке более чем в 6 раз превышает максимальную норму выработки на ручной очистке вырубок (для самых благоприятных условий).

Не лишним будет отметить такой факт, что большинство современных лесозаготовительных предприятий заготавливает лес посредством различных лесозаготовительных машин, а не при помощи бензиномоторных пил. В связи с этим численный состав лесозаготовительных бригад, в большинстве случаев, довольно небольшой — обычно 5—6 человек [85]. Причём это высококвалифицированные и дорогостоящие операторы, которых не поставишь на ручной сбор порубочных остатков [86]. Набирать бригады на очистку лесосек из местного населения получается далеко не всегда. Даже при предложении сравнительно высокой оплаты за этот достаточно физически тяжёлый труд собрать бригаду на очистку, по разным, обычно социально-демографическим, причинам не получается [87].

Таблица 4. Нормы выработки на очистке вырубок от порубочных остатков грабельным подборщиком, гектаров в смену (смена 7 ч) [82]

Table 4. Production standards for cutting site clearing from felling residues with a site-prep rake, ha per shift (7 hour shift) [82]

Длина гона, м	Запас леса на 1 га, м ³		
	до 80	80—120	121 и более
100	3,0	3,0	2,9
200	3,4	3,4	3,4
300	3,6	3,6	3,5
400	3,7	3,7	3,6
500	3,8	3,7	3,6

Большой проблемой в настоящее время является практически полная ликвидация отечественного лесного машиностроения, в связи с чем найти базовый трактор для грабельного подборщика крайне сложно [88—90]. Применяемые, в основном на российских лесозаготовительных предприятиях, колёсные форвардеры для этого не приспособлены, а гусеничной техники, способной обеспечить требуемую силу тяги, практически нет [91], [92].

В сельском хозяйстве также используют принцип грабельной подборки, например сена (фото 6), при помощи навесного технологического оборудования. Но проблема в том, что на обрабатываемых сельскохозяйственных полях нет пней, камней и т. п. препятствий. У лесных подборщиков ПСГ-2,4/ПСГ-2,9, ЛТ-161 и других каждый зуб установлен на индивидуальном шарнире, который позволяет зубу подниматься вверх при встрече с подобным препятствием и вновь опускаться после его прохождения [93].

В этой связи, вероятно, можно рассмотреть вариант производства несложного по конструкции прицепного грабельного подборщика на основе достаточно старого технического решения — конструкции В. П. Шевкунова. Она напоминает конные санные

грабли (рисунок 3) и является прицепом к трактору. На переднем конце — дышло рядом с серьгой тросовой петлёй закрепляется блок, через который проходит рабочий канат лебёдки трактора к кольцу рычага подъёма зубьев; восемь основных собирающих зубьев шарнирно крепятся к оси независимо друг от друга. К основному собирающему зубу шарнирно прикреплён малый откидной зуб, к концу которого приварена пластинчатая «подошва». Для ограничения отклонения откидного зуба к основному зубу присоединены рессорные листы, удерживающие конечную часть зуба при сборе сучьев. При встрече с препятствием рессора отжимается и зубья, поднимаясь и пропуская его, затем становятся в исходное положение [84].



Фото 6. Сенной грабельный подборщик

Photo 6. Hay rake pick-up

При ручном сборе порубочных остатков в кучи, как уже было отмечено, их собирают на крупных пнях, стараясь делать кучи побольше, но носить при этом поменьше. Собрать потом порубочные остатки из этих куч для последующей вывозки к месту переработки, например верхнему складу, достаточно сложно. Хотя из старых и простых конструкций для решения данной задачи вполне возможно использовать съёмное навесное устройство к чокерному трелёвочному трактору (рисунок 4). На щите трактора закрепляется качающаяся рама, на которой свободно перемещается каретка с зубьями-захватами. Для подъёма каретки используется лебёдка трактора. Трактор с опущенным щитом и поднятой рамой подходит к предварительно сформированной вручную куче порубочных остатков, задним ходом сдвигая её. Затем рама опускается, захваченные зубьями порубочные остатки натяжением каната уплотняются на щите, щит поднимается, и трактор совершает грузовой ход [84].

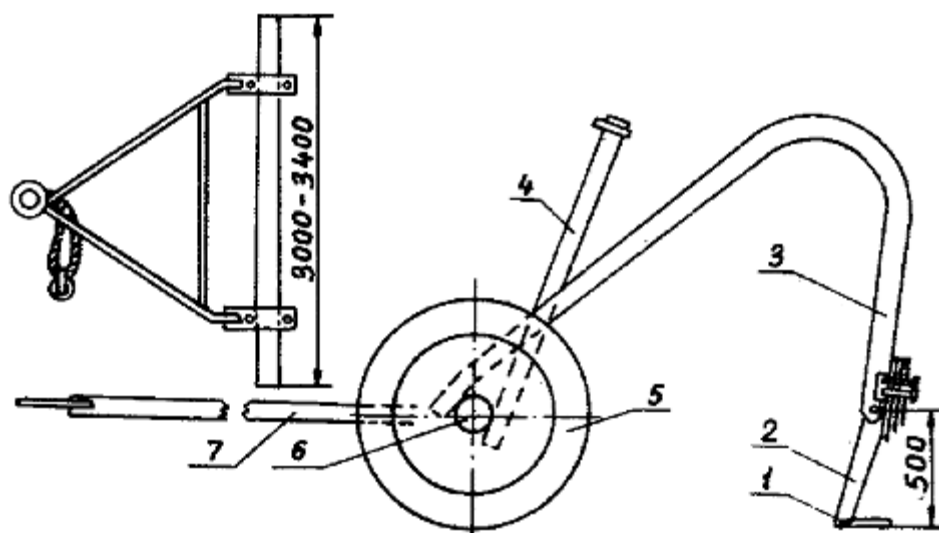


Рисунок 3. Схема прицепного подборщика В. П. Шевкунова [84]: 1 — пластинчатая «подошва»; 2 — малый откидной зуб; 3 — основной собирающий зуб; 4 — рычаг подъёма зубьев; 5 — колесо; 6 — ось; 7 — дышло

Figure 3. Scheme of V. P. Shevkunov's trailer pick-up [84]: 1 — backing plate; 2 — small folding claw; 3 — main collecting claw; 4 — claw lifting lever; 5 — wheel; 6 — axle; 7 — drawbar

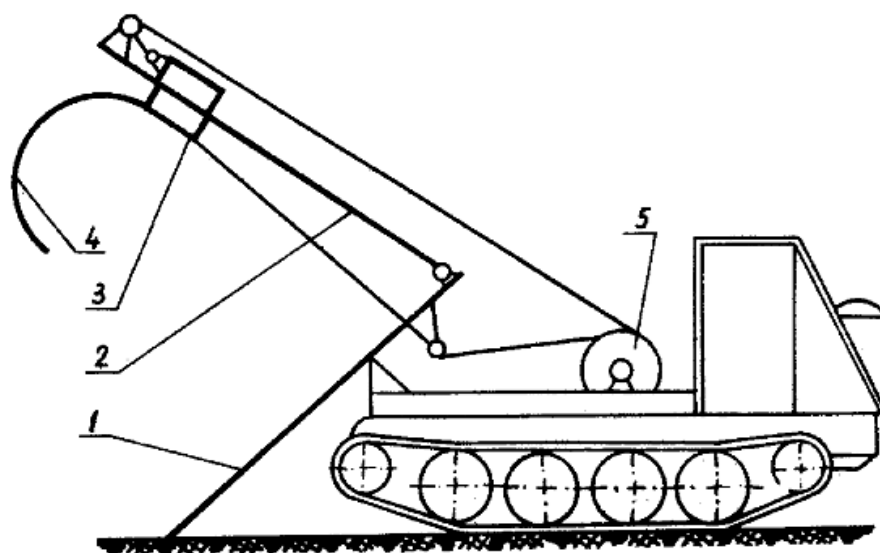


Рисунок 4. Схема подборщика порубочных остатков из предварительно сформированных куч [84]: 1 — щит; 2 — рама; 3 — каретка; 4 — зубья-захваты; 5 — лебёдка

Figure 4. The scheme of pick-up performance collecting felling residues from pre-formed heaps [84]: 1 — shield; 2 — frame; 3 — carriage; 4 — grippers; 5 — winch

При машинной очистке вырубок перед началом работы грабельного подборщика на вырубке выставляют хорошо видимые оператору вешки, которые образуют оси создаваемых подборщиком валов. Ходы подборщика назначаются перпендикулярно осям валов порубочных остатков, обычно поперёк пасечных волоков (рисунок 5). В начале гона подборщик опускает грабельный аппарат и следует к оси первого вала, достигнув которой, поднимает грабельный аппарат, оставляя собранные по пути порубочные остатки. Вновь опускает грабельный аппарат и следует до оси второго вала, и т. д. Достигнув конца гона, погрузчик смещается на ширину захвата грабельного аппарата и движется в обратную сторону. При этом цикл сбора валов повторяется.

После окончания работы грабельного подборщика или его перемещения на расстояние зоны безопасности, если планируется сбор и вывоз порубочных остатков для последующего использования, приступает к работе манипуляторный подборщик, оснащённый кузовом для порубочных остатков, представляющим собой прицепное технологическое оборудование к бесчokerному трелёвочному трактору (рисунок 6), или форвардер с модернизированной грузовой платформой.

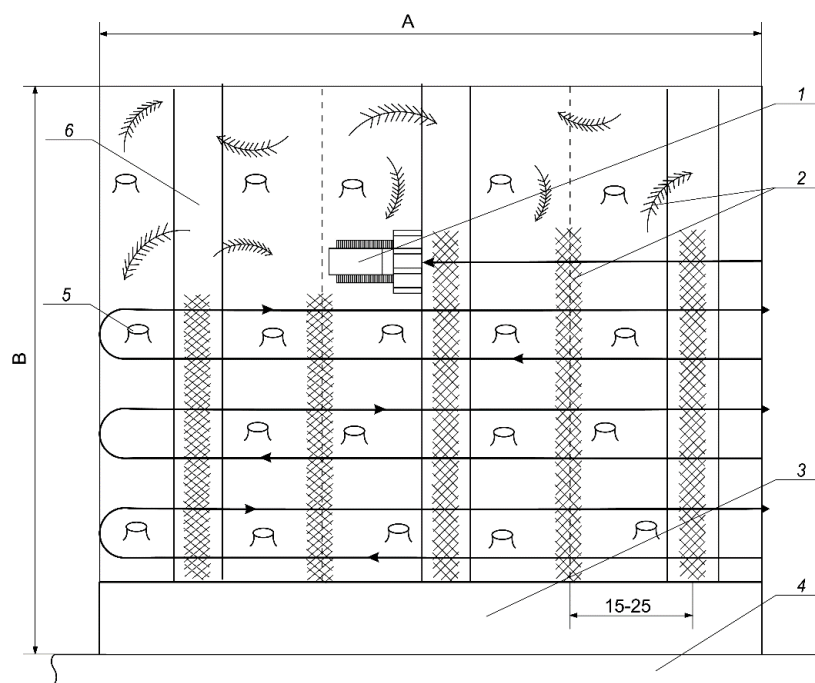


Рисунок 5. Схема очистки вырубок грабельным подборщиком от порубочных остатков [82]: 1 — грабельный подборщик сучьев; 2 — порубочные остатки; 3 — зона безопасности; 4 — лесовозный ус; 5 — вырубка; 6 — пасечный трелёвочный волок

Figure 5. Scheme of cutting site clearing from felling residues with a site-prep rake [82]: 1 — site-prep rake; 2 — felling residues; 3 — safety zone; 4 —secondary track road; 5 — felling site; 6 —skidding track

Конструкция захвата для сбора сучьев отличается от конструкции обычного захвата форвадера, поскольку захват для сортиментов вместе с порубочными остатками захватывает часть почвогрунта и не проникает в достаточной степени глубоко в кучу лесосечных отходов. Поэтому для этих целей используются грейферные захваты вильчатого типа (фото 7), объём захватываемого материала у них почти на 4 % больше, чем у захватов обычного типа [94].

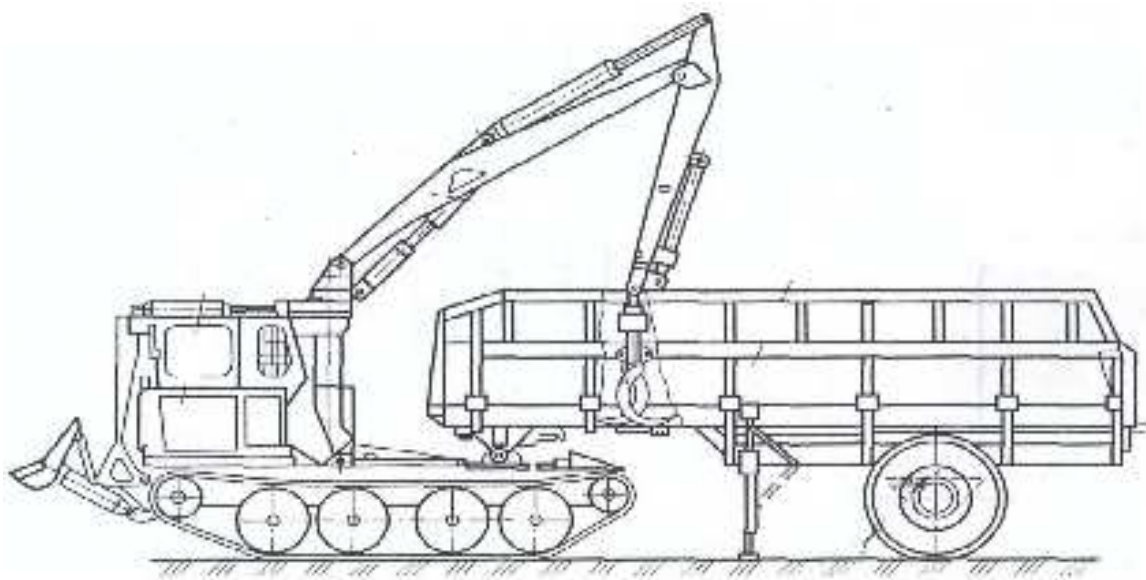


Рисунок 6. Манипуляторный подборщик порубочных остатков

Figure 6. Manipulator slash collector of felling residues

Модернизация грузовой платформы форвардера путём установки дополнительных поддонов позволяет существенно увеличить её объём (фото 8). Если средний форвардер со стандартной грузовой платформой может трелевать около 4—5 м³ порубочных остатков, то при соответствующей модернизации объём перевозимой пачки может быть увеличен до 8—14 м³ [94].

Для повышения эффективности трелёвки порубочных остатков известна модернизация данного типа машин, направленная на уплотнение погруженных на грузовую платформу порубочных остатков (фото 9) [94].

Помимо использования модернизированных форвардеров, возможно использование прицепных модулей (для сбора и транспортировки порубочных остатков), агрегируемых с обычными тракторами (фото 10) [94]. То есть при вышеописанной технологии работает двухмашинный комплекс по сбору и перемещению порубочных остатков к усу лесовозной дороги.

В Республике Беларусь для очистки лесосек от порубочных остатков, с их последующим вывозом для дальнейшего использования, используют двухмашинный комплекс на базе тракторов МТЗ (фото 11) [95], [96].

В исследовании [97] предложен одномашинный комплекс для сбора и перемещения порубочных остатков к усу лесовозной дороги (рисунок 7), представляющий собой базовый трактор с прицепным технологическим оборудованием — катком с шипами и навесным технологическим оборудованием — кузовом для порубочных остатков. Во время перемещения по вырубке каток, за счёт большого веса, накалывает крупные порубочные остатки на установленные на его внешнем корпусе шипы. По мере вращения барабана наколотые на шипы порубочные остатки доходят до фигурных прорезей края кузова, которые пропускают шипы, одновременно снимая наколотые порубочные остатки. После загрузки кузова машина, отцепив каток, может перемещаться к месту складирования собираемого груза. Такое техническое решение позволяет отказаться от мощного гусеничного трактора, поскольку сила сопротивления качению катка много меньше, чем сила сопротивления волочению по земле собираемых в грабли порубочных остатков.



Фото 7. Грейферное захватное устройство вилчатого типа [94]

Photo 7. Fork-type grapple unit [94]



Фото 8. Платформа форвардера для транспортировки порубочных остатков Ponsse Buffalo [94]

Photo 8. Forwarder platform for felling residues transportation, Ponsse Buffalo [94]

Как уже было отмечено, основную пожарную и фитопоталогическую опасность представляют собой именно крупные порубочные остатки [45], а древесная мелочь, которую не может собрать представленная на рисунке 7 машина, опасности не представляет. Наоборот, она быстро сгниёт и удобрит почвенный слой на вырубке.



Фото 9. Грузовая платформа машины TimberPro 810B [94]

Photo 9. TimberPro 810B Truck Platform [94]



Фото 10. Машина для сбора и транспортировки порубочных остатков на базе сельскохозяйственного трактора марки Havu Hukka фирмы Vapo Oy [94]

Photo 10. A machine for collecting and transporting felling residues based on an agricultural tractor of the Howo Hoko brand of the Vapo Oy company [94]

Чем меньше размер оставляемых на вырубке порубочных остатков, тем быстрее произойдёт их биологическая деструкция (при прочих равных условиях). В связи с этим достаточно перспективным выглядит вариант использования для вывоза с лесосеки крупных порубочных остатков, например откомлёвок, при помощи минитракторов с кузовом на колёсном или гусеничном ходу. Загрузку этих порубочных остатков можно осуществлять вручную. В принципе при таком варианте тоже будет использоваться одномашинный комплекс.

Во время разработки лесосеки самым популярным в настоящее время в России и мире машинным комплексом харвестер + форвардер порубочные остатки могут укладываться на трелёвочные волокна (при плохих почвенно-грунтовых условиях) или в кучи на пасеке, сбоку от волокна (при хороших почвенно-грунтовых условиях). В последнем случае возможен эффективный сбор порубочных остатков, поскольку они будут сконцентрированы в кучи, объём которых коррелируется с количеством и породой деревьев, которые может обработать харвестер с одной технологической стоянки. За рубежом для сбора порубочных остатков при машинной скандинавской технологии лесосечных работ используют специальные машины, увязывающие их в пакеты и распиливающие в одинаковый размер по длине.



а



б

Фото 11. Двухмашинный комплекс для очистки лесосек от порубочных остатков с их последующим вывозом для дальнейшего использования на базе тракторов МТЗ [95]: *а* — грабельный подборщик с передней навеской на трактор; *б* — подборщик порубочных остатков из куч и валов для их последующего вывоза

Photo 11. A two-machine complex for cutting area clearing from felling residues, with their subsequent transportation for further use, based on MTZ tractors [95]: (**a**) a site-prep rake with a front mounted attachment to the tractor; (**b**) a collector of felling residues from piles for their subsequent transportation

Затем полученные пакеты порубочных остатков собирают и доставляют на погрузочный пункт обычным форвардером. После чего эти снопы могут быть вывезены автолесовозом к месту их дальнейшего использования (обычно к котельной, в которой они измельчаются в топливную щепу, а затем сжигаются для получения тепловой энергии). Различают пакетирующие установки с продольным по отношению к оси установки (фото 12) и боковым (фото 13) сбросом пакета [94]. В Российской Федерации опыт эксплуатации таких машин есть в Республике Коми на предприятии ООО «Лузалес».

Вместе с тем даже у увязанных в пакеты порубочных остатков коэффициент полндревесности невелик, что делает нерентабельным такой вариант их использования при перевозке на большие расстояния, которые, как уже отмечалось, характерны для Сибири и Дальнего Востока. Но как показывают результаты исследований, собранные порубочные остатки можно эффективно использовать для энергоснабжения лесных терминалов — непостоянных лесных складов типа 4 НС [19—21], [98—100].

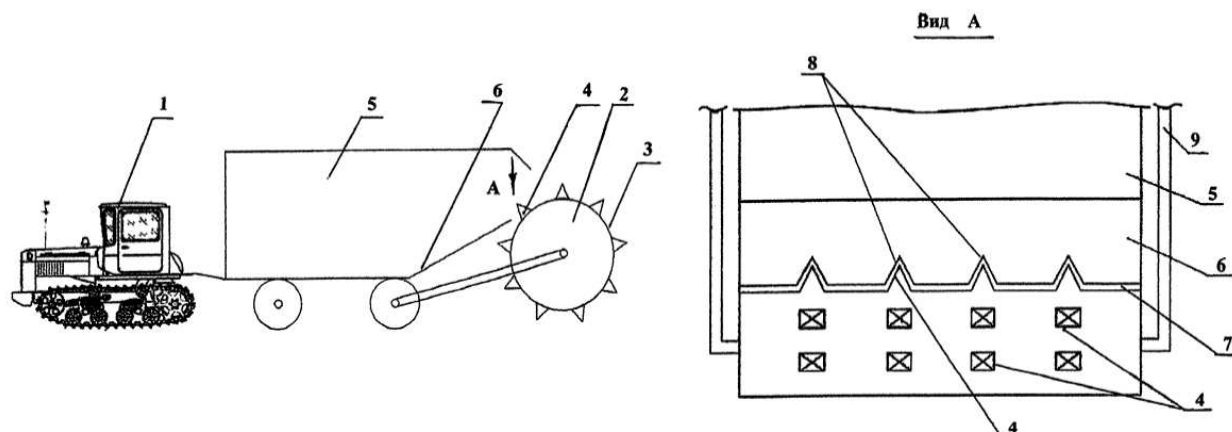


Рисунок 7. Одномашинный комплекс для очистки вырубок от порубочных остатков [97]: 1 — базовый трактор; 2 — каток; 3 — рабочая поверхность катка; 4 — острые шипы; 5 — кузов; 6 — наклонная стенка кузова; 7 — верхняя кромка наклонной стенки кузова; 8 — фигурные прорези; 9 — кронштейны крепления катка к трактору

Figure 7. Single-machine complex for cutting site clearing from felling residues [97]: 1 — basic tractor; 2 — roller; 3 — working surface of the roller; 4 — sharp spikes; 5 — body; 6 — inclined body wall; 7 — upper edge of the inclined body wall; 8 — shaped slots; 9 —brackets for the roller mounting to tractor



Фото 12. Пакетирующий модуль Fiberpac на базе John Deere 1490D [94]

Photo 12. Fiberpac packaging module based on John Deere 1490D [94]



Фото 13. Пакетирующий модуль Wood Ras на базе форвардера Valmet [94]

Photo 13. Wood Ras packaging module based on Valmet forwarder [94]

4. Выводы

Из представленного в статье обзора можно сделать следующие основные выводы:

1. Очистка лесосек от порубочных остатков является существенной проблемой, особенно в многолесных удалённых районах, в которых отсутствуют предприятия по переработке балансовой древесины.
2. Задача качественной очистки лесосек и эффективной переработки порубочных остатков, например в прессованное биотопливо, напрямую относится к концепции «бережливого производства в лесозаготовительном производстве».
3. В литературе нет сведений по прогнозному количеству порубочных остатков на вырубках при разработке лесосек современными системами машин, когда технология лесосечных работ предусматривает производство откомлёвки, отсутствует вывозка тонкомерных сортиментов.
4. Для эффективной переработки (утилизации) порубочных остатков в большей части случаев необходимо их предварительное измельчение.

Исследование выполнено в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Материалы исследования получены на средства гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Список литературы

1. Королёва В. Б., Пащканг Н. Н. Проблемы и перспективы внедрения концепции «бережливого производства» в сельском хозяйстве // Теория и практика современной экономики: Материалы нац. студ. научно-практич. конф. Рязань, 2023. С. 122—128.
2. Маслова Е. С., Иванова И. В. К вопросу развития концепции «бережливое производство» // Семьдесят пятая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием: Сб. материалов конф.: В 3 ч. Ярославль, 2022. С. 746—747.
3. Седельникова И. М., Кукукина И. Г., Федоров О. В. Методологический подход к оценке результативности концепции «бережливое производство» в российских промышленных компаниях // Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством. 2022. № 2 (52). С. 64—74.
4. Поцулин А. Д., Шилов А. С. Особенности внедрения концепции «бережливого производства» в организации // Наука, техника, промышленное производство: история, современное состояние, перспективы: Материалы научно-практич. конф. Владивосток, 2019. С. 440—442.
5. Чебукова А. В., Гаринова Г. Р., Чернявская Я. С. Методические основы внедрения «бережливого производства» // Качество в производственных и социально-экономических системах: сб. науч. тр. 7-й Междунар. научно-техн. конф. Курск, 2019. С. 188—190.
6. Повышение эффективности тушения лесных пожаров на основе прогнозных моделей их возникновения / О. И. Гринько, О. И. Григорьева, И. В. Григорьев [и др.] // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Материалы Междунар. научно-практич. конф. Воронеж, 2020. С. 242—246.
7. Рудов С. Е., Григорьева О. И., Григорьев И. В. Эффективное восстановление лесов на вечной мерзлоте // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: Материалы 86-й научно-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с междунар. участием). Минск, 2022. С. 38—41.
8. Григорьев И. В., Куницкая О. А., Беляев Н. Л. Актуальные проблемы лесозаготовительного производства в России на рубеже 2022 года // Комплексные вопросы аграрной науки и образования: Сб. науч. ст. по материалам Внутривуз. научно-практич. конф., посвящённой 65-летию высшего аграрного образования Республики Саха (Якутия) и Всерос. студ. научно-практич. конф. с междунар. участием в рамках «Северного форума — 2021». Якутск, 2021. С. 265—271.
9. Технология и оборудование лесопромышленных производств. Технология и машины лесосечных работ: Учеб. пособие / И. В. Григорьев, А. К. Редькин, В. Д. Валяжонков [и др.]. СПб.: Изд-во ЛТА, 2010. 330 с.
10. Григорьев И. В., Куницкая О. А. Оптимальный выбор лесовозного автопоезда // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2019. С. 74—78.
11. Григорьев И. В. Перевозка лесоматериалов по железной дороге // Потенциал науки и образования: современные исследования в области агрономии, землеустройства, лесного хозяйства. Якутск, 2019. С. 5—9.
12. Куницкая О. А., Беляев Н. Л. Анализ методов измерений круглых лесоматериалов и их систем учёта в лесном комплексе // Комплексные вопросы аграрной науки и образования: Сб. науч. ст. по материалам Внутривуз. научно-практич. конф., посвящённой 65-летию высшего аграрного образования Республики Саха (Якутия)

- и Всерос. студ. научно-практич. конф. с междунар. участием в рамках «Северного форума — 2021». Якутск, 2021. С. 279—285.
13. *Шегельман И. Р., Полежаев К. В., Щукин П. О.* К оценке ресурсов биомассы дровяной древесины для производства щепы энергетического назначения // Наука и бизнес: пути развития. 2012. № 2 (8). С. 16—18.
 14. *Леонов Е. А., Федоренчик А. С., Ледницкий А. В.* Определение коэффициентов полндревесности отходов лесозаготовок // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 2: Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2008. № 2. С. 57—60.
 15. Техничко-экономический анализ производства биотоплива из древесины / О. А. Куницкая, И. В. Григорьев, А. Б. Давтян [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 12. С. 29—35.
 16. Технология и оборудование лесных складов и лесобрабатывающих цехов: Учебник / Под ред. В. И. Пятакина. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. 384 с.
 17. Развитие циркулярной экономики в России: рынок биотоплива / А. А. Тамби, С. С. Морковина, И. В. Григорьев [и др.] // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9, № 4 (36). С. 173—185.
 18. Биотопливо в коммунальной энергетике: возможности использования // ЛесПромИнформ. 2023. № 4 (174) С. 12—14.
 19. *Куницкая О. А., Помигуев А. В.* Получение электроэнергии из отходов лесозаготовок и деревообработки // Управление земельными ресурсами, землеустройство, кадастр, геодезия и картография. Проблемы и перспективы развития: Сб. материалов Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием, посвящённой 255-летию землеустройству Якутии и Году науки и технологий. Якутск, 2021. С. 320—327.
 20. Теоретический анализ процесса брикетирования измельчённых древесных материалов в условиях лесного терминала / О. А. Куницкая, А. В. Помигуев, Д. Д. Бурмистрова [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2021. № 9. С. 25—33.
 21. Обоснование технологии производства и экспериментальные исследования свойств топливных брикетов, предназначенных для использования в условиях лесных терминалов / А. В. Помигуев, О. А. Куницкая, И. В. Григорьев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 1 (49). С. 59—66.
 22. Математическая модель брикетирования измельчённых древесных материалов на лесных терминалах / А. В. Помигуев, О. А. Куницкая, Е. А. Тихонов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 3 (51). С. 129—134.
 23. *Григорьев И., Григорьева О., Цыгарова М.* Вахтовые лесозаготовки. Теория и практика. Ч. 1 // ЛеспромИнформ. 2016. № 1. С. 60—65.
 24. *Григорьев И., Григорьева О., Цыгарова М.* Вахтовые лесозаготовки. Теория и практика. Ч. 2 // ЛеспромИнформ. 2016. № 2. С. 72—78.
 25. *Куницкая О. А., Григорьев И. В., Мануковский А. Ю.* Техничко-экономическое сравнение производства топливных брикетов и пеллет из древесины // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. № 57. С. 40—43.
 26. *Куницкая О. А.* Оценка экономики производства древесных пеллет в России // Потенциал науки и образования: современные исследования в области агрономии, землеустройства, лесного хозяйства. Якутск, 2019. С. 27—32.
 27. Mechanical and microstructural changes in post-fire raw wood / A. Lukina, M. Lisyatnikov, V. Martinov [et al.] // Architecture and Engineering. 2022. Vol. 7, no. 3. P. 44—52.
 28. Strength properties of raw wood after a wildfire / A. Lukina, M. Lisyatnikov, M. Lukin [et al.] // Magazine of Civil Engineering. 2023. No. 3 (119). P. 11907.

29. Прочность и деформативность сырьевой древесины после огневого воздействия / А. В. Лукина, М. С. Лисятников, В. А. Мартынов [и др.] // Строительство и реконструкция. 2022. № 6 (104). С. 40—49.
30. Прогнозная модель послепожарного лесовосстановления в Иркутской области / О. И. Григорьева, О. И. Гринько, И. В. Григорьев [и др.] // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13, № 1 (49). С. 85—98.
31. Основные ошибки вальщиков, приводящие к выходу из строя бензиномоторных пил / А. В. Гончаров, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2018. № 10. С. 17—21.
32. Куницкая О. А. Проактивный сервис для лесных машин // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Шестой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2020. С. 86—87.
33. Технология и машины лесовосстановительных работ / Р. Р. Сафин, И. В. Григорьев, О. И. Григорьева [и др.]. М.: Деревообрабатывающая пром-сть, 2015. 230 с.
34. Метод оценки эффективности лесовосстановительных мероприятий с учётом параметров лесотранспортной сети / Р. Н. Ковалев, И. М. Еналеева-Бандура, А. Н. Баранов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 4 (56). С. 64—71.
35. Шурнеев Д. Г. К вопросу применения мульчировщика для сохранения влаги в почве // Студенческая наука — первый шаг в академическую науку: Материалы Всерос. студ. научно-практич. конф. с участием школьников 10—11-х классов: В 3 ч. Чебоксары, 2023. С. 918—923.
36. Котельников Н. В., Приудзе Е. В., Гагунов С. П. Техничко-экономическое обоснование проекта по внедрению биотопливного котла для утилизации древесных порубочных остатков // Байкальская наука: идеи, инновации, инвестиции. Иркутск, 2019. С. 14—20.
37. Шатравко В. Г. Исследование минеральных элементов питания в порубочных остатках насаждений основных лесобразующих пород Беларуси // Труды БГТУ. Серия № 1 (157): Лесное хозяйство. 2013. № 1. С. 117—119.
38. Дорожко А. В., Федоренчик А. С., Протас П. А. Методика лабораторных исследований вязкоупругих свойств порубочных остатков // Леса Европейского региона — устойчивое управление и развитие: Материалы Междунар. научно-техн. конф.: В 2 ч. / Белорус. гос. технолог. ун-т; Редкол.: д-р с.-х. наук, проф. О. А. Атрощенко, канд. техн. наук, доц. А. И. Ламоткин, канд. техн. наук, доц. А. А. Янушкевич. Минск, 2002. С. 255—257.
39. Основы лесного хозяйства / Р. Р. Сафин, И. В. Григорьев, О. И. Григорьева [и др.]. М.: Изд-во журнала «Деревообрабатывающая промышленность», 2015. 170 с.
40. Григорьева О. И., Гринько О. И., Николаева Ф. В. Весенний отжиг для снижения пожароопасности лесов // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Восьмой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2022. С. 54—55.
41. Рудов С. Е., Куницкая О. А. Теоретические исследования экологической совместимости колёсных лесных машин и мерзлотных почвогрунтов лесов криолитозоны // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2020. С. 323—326.
42. Экологические и лесоводственные аспекты работы лесных машин в лесах криолитозоны / С. Е. Рудов, О. А. Куницкая, М. Ф. Григорьев [и др.] // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. № 57. С. 14—17.
43. Чевычелов А. П. Пирогенные трансформации свойств и состава мерзлотной палевой серой почвы Центральной Якутии // Наука и образование. 2016. № 1 (81). С. 95—100.

44. Иванова Т. И., Чевычелов А. П., Кузьмина Н. П. Влияние пирогенно-индуцированных геоморфологических процессов на состояние микробоценозов мерзлотных почв Центральной Якутии // Наука и образование. 2017. № 2 (86). С. 111—117.
45. Арефьев Ю. Ф. Фитопатология: Учебник для студентов лесохозяйственных факультетов высш. учеб. заведений; доп. Метод. комиссией лесохозяйственного факультета Воронеж. гос. лесотехн. академии в качестве учебника для студентов, обучающихся по спец. 260100 «Лесное хозяйство» и 260500 «Лесное, садово-парковое и ландшафтное строительство». Воронеж, 2002. 298 с.
46. Григорьева О. И., Григорьев М. Ф., Григорьев И. В. Анализ естественного лесовозобновления в Алексеевском участковом лесничестве Республики Саха (Якутия) // Forest Engineering: Материалы научно-практич. конф. с междунар. участием. Якутск, 2018. С. 72—75.
47. Бартенев И. М. Природоохранные технологии лесопользования и лесовосстановления // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 3-4 (8-4). С. 121—126.
48. Ятманова Н. М., Мустафина А. Р., Хасанова А. Ш. Оценка эффективности понижения пней при создании лесных культур в условиях Зеленодольского лесничества РТ // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы XVIII Междунар. научно-техн. конф. Вологда, 2020. С. 111—113.
49. Бартенев И. М., Драпалюк М. В. Совершенствование технологии лесовосстановления на вырубках с применением энергонасыщенных тракторов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021. № 5 (383). С. 117—133.
50. Рудов С. Е., Григорьев И. В. Правила эффективной эксплуатации форвардеров // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Седьмой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2021. С. 166—168.
51. Рудов С. Е. Способы повышения работоспособности трелёвочных волоков на слабонесущих почвогрунтах // Инновационные процессы в науке и технике XXI века: Материалы XVIII Междунар. научно-практич. конф. студентов, аспирантов, ученых, педагогических работников и специалистов-практиков. Тюмень, 2021. С. 292—295.
52. Анализ способов укрепления временных транспортных путей для трелёвки и вывозки древесины / И. В. Григорьев, М. В. Зорин, Г. В. Григорьев [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. 2021. № 2. С. 10—29.
53. Машинная заготовка древесины по скандинавской технологии / О. А. Куницкая, Н. А. Чернуцкий, М. В. Дербин [и др.]. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2019. 192 с.
54. Теоретические исследования производительности форвардеров при ограничениях воздействия на почвогрунты / О. Н. Бурмистрова, А. А. Просужих, Е. Г. Хитров [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021. № 3 (381). С. 101—116.
55. Влияние переменных коэффициентов сопротивления движению и сцепления на производительность форвардера / О. Н. Бурмистрова, А. А. Просужих, Е. Г. Хитров [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. 2021. № 1. С. 3—16.
56. Зайцева М. И., Робонен Е. В., Чернобровкина Н. П. Использование порубочных остатков для приготовления торфяных субстратов при выращивании семян сосны обыкновенной с закрытой корневой системой // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2010. № 1. С. 4—8.
57. Фокин С. В. О биометрических параметрах порубочных остатков // Лесотехнический журнал. 2011. № 2 (2). С. 50—54.

58. Технологические цепочки и системы машин для сбора и переработки древесной биомассы в топливную щепу при сплошнолесосечной заготовке в сортиментах / Ю. В. Суханов, Ю. Ю. Герасимов, А. А. Селиверстов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 4 (12). С. 101—107.
59. *Шатравко В. Г.* Экологические и экономические аспекты использования порубочных остатков // Труды БГТУ. Серия № 1 (157): Лесное хозяйство. 2012. № 1. С. 130—132.
60. *Григорьева О. И., Рудов С. Е.* Перспективные пути повышения товарной ценности лесных насаждений криолитозоны // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Пятой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2019. С. 29—31.
61. Проблемы и перспективы проведения рубок леса в криолитозоне / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, С. Е. Рудов [и др.] // Сквозные технологии промышленных производств и экономическая безопасность: Материалы Всерос. научно-практич. конф. Петрозаводск, 2019. С. 43—46.
62. *Никифоров О. А., Куницкая О. А.* Пути совершенствования схем лесной сертификации в области оценки экологического воздействия // Вестник АГАТУ. 2022. № 3 (7). С. 55—69.
63. *Никифоров О. А., Куницкая О. А.* Информационная база оценки и управления рисками для лесных экосистем, возникающими в результате ведения хозяйственной деятельности // Вестник АГАТУ. 2022. № 3 (7). С. 82—120.
64. *Зорин М. В., Куницкая О. А.* Инновационные методы строительства лесных дорог // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: Материалы Всерос. научно-практич. конф. / Отв. ред.: Ю. А. Безруких, Е. В. Мельникова. Красноярск, 2022. С. 84—87.
65. *Зорин М. В., Куницкая О. А.* Современные сборно-разборные покрытия для строительства временных лесных дорог и технологических коридоров // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: Материалы 86-й научно-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с междунар. участием). Минск, 2022. С. 54—57.
66. *Зорин М. В., Куницкая О. А.* Типы современных пластиковых плит для строительства временных лесных дорог и технологических коридоров // Деревянное домостроение Севера: традиции и инновации: Сб. ст. по материалам Всерос. научно-практич. конф. Петрозаводск, 2023. С. 28—30.
67. *Слинченков А. Н., Редькин А. К., Ярцев И. В.* Производство товаров народного потребления: Учеб. пособие для студентов спец. 260100. М.: МГУЛ, 2002. 104 с.
68. *Никитин М. В.* Некоторые пути улучшения использования лесосечных отходов // Методология развития региональной системы лесопользования в Республике Коми: Сб. материалов науч. конф. Сыктывкар, 2012. С. 122—123.
69. *Григорьева О. И., Гринько О. И., Григорьев И. В.* Моделирование развития многокомпонентной лесной экосистемы после лесного пожара // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: Материалы 86-й научно-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с междунар. участием). Минск, 2022. С. 34—37.
70. *Никитина Е. И., Куницкая О. А., Николаева Ф. В.* Проект организации лесозаготовок в условиях Алданского лесничества с применением многооперационных лесозаготовительных комплексов // Современные проблемы и достижения аграрной науки в Арктике: Сб. науч. ст. по материалам Всерос. студ. научно-практич. конф. с междунар. участием в рамках «Северного форума — 2020» (29—30 сент. 2020 г.,

- Якутск) и Междунар. науч. онлайн летней школы — 2020 (6—20 июля 2020 г., Якутск). Якутск, 2020. С. 138—148.
71. Григорьев И. В., Никифорова А. И., Григорьева О. И. Сравнение одномашинных комплексов для сортиментной заготовки древесины // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 9-2 (20-2). С. 125—128.
72. Совершенствование конструкции валочно-пакетирующей машины / И. В. Григорьев, И. И. Тихонов, А. И. Никифорова [и др.] // Справочник. Инженерный журнал. 2014. № 2 (203). С. 57—60.
73. Григорьев И. В., Григорьева О. И. Процессы лесосечных работ. Хлыстовая и сортиментная технологии // Лесозаготовка. Бизнес и профессия. 2015. № 1. С. 18—22.
74. Оценка надёжности лесозаготовительного харвестера / А. П. Мохирев, О. А. Куницкая, Г. А. Калита [и др.] // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2022. Т. 26, № 5. С. 93—101.
75. Скобцов И. Г., Куницкая О. А. Требования стандартов по безопасности при работе на лесных машинах // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 1. С. 51—56.
76. Технологический алгоритм производства продукции из порубочных остатков / А. П. Мохирев, К. П. Рукомойников, М. М. Герасимова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023. № 1 (391). С. 153—171.
77. Анализ энергетического баланса технологических цепочек предприятий лесной промышленности / И. А. Маганов, Е. А. Тихонов, В. С. Сюнёв [и др.] // Вестник АГАТУ. 2021. № 4 (4). С. 87—108.
78. Заровняев Т. Д., Никитина Е. И., Куницкая О. А. Технологический процесс по переработке отходов лесозаготовительного производства // Современные проблемы и достижения аграрной науки в Арктике: Сб. науч. ст. по материалам Всерос. студ. научно-практич. конф. с междунар. участием в рамках «Северного форума — 2020» (29—30 сент. 2020 г., Якутск) и Междунар. науч. онлайн летней школы — 2020 (6—20 июля 2020 г., Якутск). Якутск, 2020. С. 107—114.
79. Куницкая О. А. Тенденции развития лесопромышленного комплекса Республики Саха (Якутия) // Вестник АГАТУ. 2022. № 2 (6). С. 70—79.
80. Лесное ресурсоведение: Учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки дипломированных бакалавров направления 250400.62 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств» по профилю «Лесоинженерное дело» / Ю. А. Ширнин, И. В. Григорьев, А. И. Никифорова [и др.]. Йошкар-Ола: Изд-во: Поволж. гос. технол. ун-та, 2012. 355 с.
81. Терновская О. В., Платонов А. А. Моделирование классификационных признаков лесных граблей // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11, № 3 (43). С. 172—182.
82. Григорьев И. В., Тихонов И. И., Куницкая О. А. Технология и машины лесосечных работ: Учеб. пособие по курсовому проектированию для студентов направлений подготовки бакалавров 250400 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств» по профилю «Лесоинженерное дело». СПб.: СПбГЛТУ, 2013. 132 с.
83. Заборцева Л. П. Роль института «КОМИГИПРОНИИЛЕСПРОМ» в механизации лесозаготовительных и лесосплавных работ (1950—80-е гг.) // Научные чтения: Сб. материалов научно-практич. конф. профессорско-преподавательского состава Сыктывкарского лесного института по итогам научно-исследовательской работы в 2008 году / Отв. ред. В. В. Жиделева; отв. за вып. А. М. Попова. Сыктывкар, 2009. С. 203—206.
84. Григорьева О. И. Очистка лесосек от порубочных остатков // Лесозаготовка. Бизнес и профессия. 2015. № 1 С. 47—48.

85. Григорьев И. В., Григорьева О. И. Перспективные направления повышения качества подготовки специалистов в области лесопользования // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2-2 (13-2). С. 205—208.
86. Григорьев И. В., Григорьева О. И. Практика подготовки операторов лесных машин в России // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: Материалы Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием / Отв. ред.: Ю. А. Безруких, Е. В. Мельникова. Красноярск, 2017. С. 182—185.
87. Оценка мероприятий, направленных на улучшение условий труда персонала на лесосечных и лесохозяйственных работах / И. В. Григорьев, О. И. Григорьева, А. И. Мотовилов [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 6. С. 51—60.
88. Проблемы повышения качества отечественного лесного машиностроения / О. А. Куницкая, В. А. Макуев, Т. Н. Стородубцева [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 4 (56). С. 57—63.
89. Григорьев И. В. Современные проблемы импортозамещения в лесном машиностроении Российской Федерации // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: Материалы Всерос. научно-практич. конф. / Отв. ред.: Ю. А. Безруких, Е. В. Мельникова. Красноярск, 2022. С. 165—169.
90. Григорьев И. В., Куницкая О. А. Перспективные направления опытно-конструкторских работ в лесном машиностроении // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Третьей Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2017. С. 53—56.
91. Добрецов Р. Ю., Дмитриев А. С., Григорьев И. В. Проблемы и перспективы использования в лесном комплексе машин с полугусеничным двигателем // Вестник АГАТУ. 2022. № 4 (8). С. 95—105.
92. Перспективность дальнейших исследований по совершенствованию гусеничных лесных машин / Ю. А. Карасев, В. А. Марков, А. С. Дмитриев [и др.] // Resources and Technology. 2023. Т. 20, № 1. С. 42—86.
93. Лесное ресурсоведение: Учеб. пособие / Под ред. В. И. Пятакина; А. И. Жукова, И. В. Григорьев, О. И. Григорьева [и др.]. СПб.: Изд-во СПбГЛТА, 2008. 215 с.
94. Лесосечные машины в фокусе биоэнергетики: конструкции, проектирование, расчёт: Учеб. пособие / В. С. Сюнёв, А. А. Селиверстов, Ю. Ю. Герасимов [и др.]. Йоэнсуу: НИИ леса Финляндии METLA, 2011. 143 с.
95. Фокин С. В., Храмченко А. В. Технические средства, применяемые при очистке вырубок от отходов лесосечных работ // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 9-2 (20-2). С. 280—283.
96. Фокин С. В., Чугошкина А. В. Применение малогабаритной техники при сборе и вывозе с вырубок Среднего Поволжья отходов лесосечных работ // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 9-2 (20-2). С. 283—287.
97. Григорьева О. И. Новая машина для очистки лесосек // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 5-3 (10-3). С. 96—99.
98. Результаты экспериментальных выдержек брикетирования лесосечных отходов в условиях лесных терминалов / О. А. Куницкая, А. В. Помигуев, Д. Д. Бурмистрова [и др.] // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11, № 3 (43). С. 109—120.
99. Анализ газогенерирующих систем для автономного энергоснабжения лесных терминалов / О. А. Куницкая, А. В. Помигуев, Е. Г. Калита [и др.] // Resources and Technology. 2021. Т. 18, № 3. С. 53—76.

100. Analysis of modern wood processing techniques in timber terminals / O. Kunickaya, A. Pomiguyev, I. Kruchinin [et al.] // Central European Forestry Journal. 2022. Vol. 68, no. 1. P. 51—59.

References

1. Koroleva V. B., Pashkang N. N. Problems and prospects of introducing the concept of «lean production» in agriculture. *Theory and practice of modern economics. Materials of the national student scientific and practical conference*. Ryazan, 2023, pp. 122—128. (In Russ.)
2. Maslova E. S., Ivanova I. V. On the development of the concept of «lean production». *The seventy-fifth All-Russian scientific and technical conference of students, undergraduates and postgraduates with international participation. Collection of conference materials: In 3 parts*. Yaroslavl, 2022, pp. 746—747. (In Russ.)
3. Sedelnikova I. M., Kukukina I. G., Fedorov O. V. Methodological approach to the evaluation of the effectiveness of the concept of «lean production» in Russian industrial companies. *Izvestia of higher educational institutions. Series: Economics, Finance and Production Management*, 2022, no. 2 (52), pp. 64—74. (In Russ.)
4. Potsulin A. D., Shilov A. S. Features of the introduction of the concept of lean production in the organization. *Science, technology, industrial production: history, current state, prospects. materials of the scientific and practical conference*. Vladivostok, 2019, pp. 440—442. (In Russ.)
5. Chebukova A. V., Garipova G. R., Chernyavskaya Ya. S. Methodological foundations of the introduction of «lean production». *Quality in production and socio-economic systems. collection of scientific papers of the 7th International Scientific and Technical Conference*. Kursk, 2019, pp. 188—190. (In Russ.)
6. Grinko O. I., Grigoreva O. I., Grigorev I. V., Grigorev M. F., Grigoreva A. I. Improving the efficiency of extinguishing forest fires based on predictive models of their occurrence. *Energy efficiency and energy conservation in modern production and society. Materials of the international scientific and practical conference*. Voronezh, 2020, pp. 242—246. (In Russ.)
7. Rudov S. E., Grigoreva O. I., Grigorev I. V. Effective restoration of forests on permafrost. *Forest engineering, materials science and design. materials of the 86th scientific and technical conference of the teaching staff, researchers and postgraduates (with international participation)*. Minsk, 2022, pp. 38—41. (In Russ.)
8. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Belyaev N. L. Actual problems of logging production in Russia at the turn of 2022. *Complex issues of agrarian science and education. Collection of scientific articles based on the materials of the Intra-university scientific and practical conference dedicated to the 65th anniversary of Higher Agricultural Education of the Republic of Sakha (Yakutia) and the All-Russian Student Scientific and Practical Conference with international participation in the framework of the «Northern Forum — 2021»*. Yakutsk, 2021, pp. 265—271. (In Russ.)
9. Grigorev I. V., Redkin A. K., Valyazhonkov V. D., Matrosov A. V. *Technology and equipment of timber industries. Technology and machines of logging operations: Textbook*. Saint Petersburg, LTA Publishing House, 2010. 330 p. (In Russ.)
10. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A. Optimal choice of a logging road train. *Transport and transport-technological systems. Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Ed. by N. S. Zakharov. Tyumen, 2019, pp. 74—78. (In Russ.)

11. Grigorev I. V. Transportation of timber by rail. *The potential of science and education: modern research in the field of agronomy, land management, forestry*. Yakutsk, 2019, pp. 5—9. (In Russ.)
12. Kunitskaya O. A., Belyaev N. L. Analysis of measurement methods of round timber and their accounting systems in the forest complex. *Complex issues of agrarian science and education. Collection of scientific articles based on the materials of the Intra-university scientific and practical conference dedicated to the 65th anniversary of Higher Agricultural Education of the Republic of Sakha (Yakutia) and the All-Russian Student Scientific and Practical Conference with international participation in the framework of the «Northern Forum — 2021»*. Yakutsk, 2021, pp. 279—285. (In Russ.)
13. Shegelman I. R., Polezhaev K. V., Shchukin P. O. To assess the biomass resources of woodwood for the production of energy chips. *Science and business: ways of development*, 2012, no. 2 (8), pp. 16—18. (In Russ.)
14. Leonov E. A., Fedorenchik A. S., Lednitsky A. V. Determination of coefficients of full-woodness of logging waste. *Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series 2: Forestry and woodworking industry*, 2008, no. 2, pp. 57—60. (In Russ.)
15. Kunitskaya O. A., Grigorev I. V., Davtyan A. B., Grigorev V. I., Nguyen T. N. Technical and economic analysis of biofuel production from wood. *Repair. Recovery. Modernization*, 2020, no. 12, pp. 29—35. (In Russ.)
16. *Technology and equipment of forest warehouses and timber processing workshops: Textbook*. Edited by V. I. Patyakin. Moscow, GOU VPO MGUL, 2008. 384 p. (In Russ.)
17. Tambi A. A., Morkovina S. S., Grigorev I. V., Grigorev V. I. Development of the circular economy in Russia: biofuel market. *Forestry journal*, 2019, vol. 9, no. 4 (36), pp. 173—185. (In Russ.)
18. Biofuels in municipal energy use possibilities. *LesPromInform*, 2023, no. 4 (174), pp. 12—14. (In Russ.)
19. Kunitskaya O. A., Pomiguyev A. V. Obtaining electricity from logging and woodworking waste. *Land management, land management, cadastre, geodesy and cartography. Problems and prospects of development. Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation dedicated to the 255th anniversary of Land Management in Yakutia and the Year of Science and Technology*. Yakutsk, 2021, pp. 320—327. (In Russ.)
20. Kunitskaya O. A., Pomiguyev A. V., Burmistrova D. D., Tikhonov E. A. Theoretical analysis of the process of briquetting crushed wood materials in the conditions of a forest terminal. *Repair. Recovery. Modernization*, 2021, no. 9, pp. 25—33. (In Russ.)
21. Pomiguyev A. V., Kunitskaya O. A., Grigorev I. V., Tikhonov E. A., Ivanov V. A. Substantiation of production technology and experimental studies of properties of fuel briquettes intended for use in forest terminals. *Systems. Methods. Technologies*, 2021, no. 1 (49), pp. 59—66. (In Russ.)
22. Pomiguyev A. V., Kunitskaya O. A., Tikhonov E. A., Zhang S. A. Mathematical model of briquetting of crushed wood materials at forest terminals. *Systems. Methods. Technologies*, 2021, no. 3 (51), pp. 129—134. (In Russ.)
23. Grigorev I., Grigoreva O., Tsygarova M. Shift logging. Theory and practice. Part 1. *Lesprominform*, 2016, no. 1, pp. 60—65. (In Russ.)
24. Grigorev I., Grigoreva O., Tsygarova M. Shift logging. Theory and practice. Part 2. *Lesprominform*, 2016, no. 2, pp. 72—78. (In Russ.)

25. Kunitskaya O. A., Grigorev I. V., Manukovsky A. Yu. Technical and economic comparison of the production of fuel briquettes and pellets from wood. *Actual problems of the forest complex*, 2020, no. 57, pp. 40—43. (In Russ.)
26. Kunitskaya O. A. Assessment of the economy of wood pellet production in Russia. *The potential of science and education: modern research in the field of agronomy, land management, forestry*. Yakutsk, 2019, pp. 27—32. (In Russ.)
27. Lukina A., Lisyatnikov M., Martinov V., Kunitskaya O., Chernykh A., Roschina S. Mechanical and microstructural changes in post-fire raw wood. *Architecture and Engineering*, 2022, vol. 7, no. 3, pp. 44—52.
28. Lukina A., Lisyatnikov M., Lukin M., Vatin N., Roshchina S. Strength properties of raw wood after a wildfire. *Magazine of Civil Engineering*, 2023, no. 3 (119), pp. 11907.
29. Lukina A. V., Lisyatnikov M. S., Martynov V. A., Roschina S. I. Strength and deformability of raw wood after fire exposure. *Construction and reconstruction*, 2022, no. 6 (104), pp. 40—49. (In Russ.)
30. Grigoreva O. I., Grinko O. I., Grigorev I. V., Kalita E. G., Tikhonov E. A. Predictive model of post-fire reforestation in the Irkutsk region. *Forestry Journal*, 2023, vol. 13, no. 1 (49), pp. 85—98. (In Russ.)
31. Goncharov A. V., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigorev M. F. The main mistakes of fellers leading to the failure of gasoline-powered saws. *Repair. Recovery. Modernization*, 2018, no. 10, pp. 17—21. (In Russ.)
32. Kunitskaya O. A. Proactive service for forest machines. *Improving the efficiency of the forest complex. materials of the Sixth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2020, pp. 86—87. (In Russ.)
33. Safin R. R., Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Razumov E. Y. *Technology and machines of reforestation works*. Moscow, Woodworking industry, 2015. 230 p. (In Russ.)
34. Kovalev R. N., Enaleeva-Bandura I. M., Baranov A. N., Lozovoy V. A., Grigoreva O. I., Grigorev I. V. Method of assessing the effectiveness of reforestation measures taking into account the parameters of the forest transport network. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 4 (56), pp. 64—71. (In Russ.)
35. Shurneev D. G. On the issue of using a mulcher to preserve moisture in the soil. *Student science — the first step in academic science. Materials of the All-Russian student scientific and practical conference with the participation of schoolchildren of grades 10—11: In 3 parts*. Cheboksary, 2023, pp. 918—923. (In Russ.)
36. Kotelnikov N. V., Pruidze E. V., Gagunov S. P. Feasibility study of the project for the introduction of a biofuel boiler for the disposal of wood felling residues. *Baikal Science: ideas, innovations, investments*. Irkutsk, 2019, pp. 14—20. (In Russ.)
37. Shatravko V. G. Investigation of mineral nutrition elements in the felling residues of plantings of the main forest-forming species of Belarus. *Proceedings of BSTU. Series no. 1 (157): Forestry*, 2013, no. 1, pp. 117—119. (In Russ.)
38. Dorozhko A. V., Fedorenchik A. S., Protas P. A. Methodology of laboratory studies of viscoelastic properties of felling residues. *Forests of the European region — sustainable management and development. Materials of the International Scientific and Technical Conference: In 2 parts. Belarusian State Technological University; Editorial Board: Doctor of Agricultural Sciences, prof. O. A. Atroschenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor A. I. Lamotkin, Candidate of Technical Sciences, Associate prof. A. A. Yanushkevich*. Minsk, 2002, pp. 255—257. (In Russ.)
39. Safin R. R., Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Razumov E. Y. *Fundamentals of forestry*. Moscow, Publishing house of the journal Woodworking industry, 2015. 170 p. (In Russ.)

40. Grigoreva O. I., Grinko O. I., Nikolaeva F. V. Spring annealing to reduce the fire hazard of forests. *Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Eighth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2022, pp. 54—55. (In Russ.)
41. Rudov S. E., Kunitskaya O. A. Theoretical studies of ecological compatibility of wheeled forest vehicles and permafrost soils of cryolithozone forests. *Transport and transport-technological systems. Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Editor N. S. Zakharov. Tyumen, 2020, pp. 323—326. (In Russ.)
42. Rudov S. E., Kunitskaya O. A., Grigoriev M. F., Stepanova D. I., Grigorieva O. I. Ecological and forestry aspects of the work of forest machines in the forests of the cryolithozone. *Actual problems of the forest complex*, 2020, no. 57, pp. 14—17. (In Russ.)
43. Chevychelov A. P. Pyrogenic transformations of properties and composition of permafrost pale gray soil of Central Yakutia. *Science and education*, 2016, no. 1 (81), pp. 95—100. (In Russ.)
44. Ivanova T. I., Chevychelov A. P., Kuzmina N. P. Influence of pyrogenic-induced geomorphological processes on the state of microbocenoses of permafrost soils of Central Yakutia. *Science and Education*, 2017, no. 2 (86), pp. 111—117. (In Russ.)
45. Arefyev Yu F. *Phytopathology: textbook for students of forestry faculties of higher educational institutions; add. By the Methodological Commission of the Forestry Faculty of the Voronezh State Forestry Academy as a textbook for students studying in the specialties 260100 «Forestry» and 260500 «Forest, garden and landscape construction»*. Voronezh, 2002. 298 p. (In Russ.)
46. Grigoreva O. I., Grigoriev M. F., Grigorev I. V. Analysis of natural reforestation in the Alekseevsky district forestry of the Republic of Sakha (Yakutia). *Forest Engineering. materials of the scientific and practical conference with international participation*. Yakutsk, 2018, pp. 72—75. (In Russ.)
47. Bartenev I. M. Environmental technologies of forest management and reforestation. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2014, vol. 2, no. 3-4 (8-4), pp. 121—126. (In Russ.)
48. Yatmanova N. M., Mustafina A. R., Khasanova A. Sh. Evaluation of the effectiveness of lowering stumps when creating forest crops in the conditions of the Zelenodolsk forestry of the Republic of Tatarstan. *Actual problems of the development of the forest complex. Materials of the XVIII International Scientific and Technical Conference*. Vologda, 2020, pp. 111—113. (In Russ.)
49. Bartenev I. M., Drapalyuk M. V. Improvement of the technology of reforestation in felling with the use of energy-saturated tractors. *Izvestia of higher educational institutions. Forest magazine*, 2021, no. 5 (383), pp. 117—133. (In Russ.)
50. Rudov S. E., Grigorev I. V. Rules of effective operation of forwarders. *Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Seventh All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2021, pp. 166—168. (In Russ.)
51. Rudov S. E. Ways to improve the efficiency of skidding drags on low-bearing soils. *Innovative processes in science and technology of the XXI century. materials of the XVIII International Scientific and Practical Conference of students, postgraduates, scientists, teachers and practitioners*. Tyumen, 2021, pp. 292—295. (In Russ.)
52. Grigorev I. V., Zorin M. V., Grigorev G. V., Rudov S. E., Shvetsova V. V., Kalita G. A. Analysis of ways to strengthen temporary transport routes for skidding and removal of wood. *Woodworking industry*, 2021, no. 2, pp. 10—29. (In Russ.)
53. Kunitskaya O. A., Chernutsky N. A., Derbin M. V., Rudov S. E., Grigorev I. V., Grigoreva O. I. *Machine harvesting of wood by Scandinavian technology*. Saint Petersburg, Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions, 2019. 192 p. (In Russ.)

54. Burmistrova O. N., Prosuzhikh A. A., Khitrov E. G., Kunitskaya O. A., Luneva E. N. Theoretical studies of forwarders' productivity under restrictions of impact on soils. *News of higher educational institutions. Forest magazine*, 2021, no. 3 (381), pp. 101—116. (In Russ.)
55. Burmistrova O. N., Prosuzhikh A. A., Khitrov E. G., Kunitskaya O. A., Kalita O. N. Influence of variable coefficients of resistance to movement and coupling on forwarder performance. *Woodworking industry*, 2021, no. 1, pp. 3—16. (In Russ.)
56. Zaitseva M. I., Robonen E. V., Chernobrovkina N. P. The use of felling residues for the preparation of peat substrates when growing seedlings of scots pine with a closed root system. *Bulletin of the Moscow State University of the Forest — Forest Bulletin*, 2010, no. 1, pp. 4—8. (In Russ.)
57. Fokin S. V. About biometric parameters of felling residues. *Forestry Journal*, 2011, no. 2 (2), pp. 50—54. (In Russ.)
58. Sukhanov Yu. V., Gerasimov Yu. Yu., Seliverstov A. A., Sokolov A. P. Technological chains and systems of machines for collecting and processing wood biomass into fuel chips during solid-cutting harvesting in sortings. *Systems. Methods. Technologies*, 2011, no. 4 (12), pp. 101—107. (In Russ.)
59. Shatravko V. G. Ecological and economic aspects of the use of felling residues. *Proceedings of BSTU, Series no. 1 (157): Forestry*, 2012, no. 1, pp. 130—132. (In Russ.)
60. Grigoreva O. I., Rudov S. E. Promising ways to increase the marketable value of cryolithozone forest plantations. *Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Fifth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2019, pp. 29—31. (In Russ.)
61. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Rudov S. E., Grigoreva O. I. Problems and prospects of logging in the cryolithozone. *End-to-end technologies of industrial production and economic security. Materials of the All-Russian Scientific and practical conference*. Petrozavodsk, 2019, pp. 43—46. (In Russ.)
62. Nikiforov O. A., Kunitskaya O. A. Ways to improve forest certification schemes in the field of environmental impact assessment. *Herald of AGATHU*, 2022, no. 3 (7), pp. 55—69. (In Russ.)
63. Nikiforov O. A., Kunitskaya O. A. Information base for risk assessment and management for forest ecosystems arising as a result of economic activity. *Herald of AGATHU*, 2022, no. 3 (7), pp. 82—120. (In Russ.)
64. Zorin M. V., Kunitskaya O. A. Innovative methods of construction of forest roads. *Innovations in the chemical and forestry complex: trends and prospects of development. Materials of the All-Russian Scientific and practical Conference. Editors Yu. A. Bezrukikh, E. V. Melnikova*. Krasnoyarsk, 2022, pp. 84—87. (In Russ.)
65. Zorin M. V., Kunitskaya O. A. Modern collapsible coatings for the construction of temporary forest roads and technological corridors. *Forest engineering, materials science and design. materials of the 86th scientific and technical conference of the teaching staff, researchers and postgraduates (with international participation)*. Minsk, 2022, pp. 54—57. (In Russ.)
66. Zorin M. V., Kunitskaya O. A. Type canberranspropic canberranspropic canberranspropic and technological corridors. *Dereviannoye House Building North: traditions and innovations. Proceedings of the All-Russian scientific and practical conferences*. Petrozavodsk, 2023, pp. 28—30. (In Russ.)
67. Slinchenkov A. N., Redkin A. K., Yartsev I. V. *Production of load people's consumption: educational equipment for students specialties 260100*. Moscow, MGUL, 2002. 104 p. (In Russ.)

68. Nikitin M. V. Nekotor Urga putti hit the Giant Forest-crenelevent. *Methodology the developed regionalnaya system for forestry in Republic of Komi. Proceedings of scientific conferences.* Syktyvkar, 2012, pp. 122—123. (In Russ.)
69. Grigoreva O. I., Grinko O. I., Grigorev I. V. Modeling development multi-component easy empirerystem, then easy fire. *Easy Engineering, Materials Science and design. 86th scientific and technical conferences of professorships and lecturers of sostava, scientific urgandh sotrudnikov and PhD students (with international urgandm participation).* Minsk, 2022, pp. 34—37. (In Russ.)
70. Nikitina E. I., Kunitskaya O. A., Nikolaeva F. V. Project organizations forest management in terms of Aldana forestry with replacement of multi-operative forest management and forest management complex. *Contemporaneously, the problem of the Agrarian Sciences in the Arctic. Proceedings of the scientific and practical conferences of the All-Russian scientific and practical conferences with the international urgem participation in the framework of the «Northern Forum — 2020» (September 29—30, 2020, Yakutsk) and International Science Online Summer School — 2020 (July 6—20, 2020, Yakutsk).* Yakutsk, 2020, pp. 138—148. (In Russ.)
71. Grigorev I. V., Nikiforova A. I., Grigoreva O. I. Comparison of single-machine complexes for wood sorting. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 9-2 (20-2), pp. 125—128. (In Russ.)
72. Grigorev I. V., Tikhonov I. I., Nikiforova A. I., Grigoreva O. I. Improvement of the design of the felling-packing machine. *Handbook. Engineering magazine*, 2014, no. 2 (203), pp. 57—60. (In Russ.)
73. Grigorev I. V., Grigoreva O. I. Processes of logging operations. Khlystovaya and sorting technologies. *Logging. Business and profession*, 2015, no. 1, pp. 18—22. (In Russ.)
74. Mohirev A. P., Kunitskaya O. A., Kalita G. A., Werner N. N., Shvetsova V. V. Assessment of the reliability of a logging harvester. *Forest Bulletin. Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 5, pp. 93—101. (In Russ.)
75. Skobtsov I. G., Kunitskaya O. A. Requirements of safety standards when working on forest machines. *Occupational safety and health in logging and woodworking industries*, 2022, no. 1, pp. 51—56. (In Russ.)
76. Mohirev A. P., Rukomoynikov K. P., Gerasimova M. M., Medvedev S. O., Zyryanov M. A. Technological algorithm for the production of products from felling residues. *Izvestia of higher educational institutions. Forest magazine*, 2023, no. 1 (391), pp. 153—171. (In Russ.)
77. Maganov I. A., Tikhonov E. A., Syuney V. S., Kunitskaya O. A. Analysis of the energy balance of technological chains of forest industry enterprises. *Herald of AGATHU*, 2021, no. 4 (4), pp. 87—108. (In Russ.)
78. Zarovnyaev T. D., Nikitina E. I., Kunitskaya O. A. Technological process for processing waste of logging production. *Modern problems and achievements of agricultural science in the Arctic. Collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian Student Scientific and Practical Conference with international participation in the framework of the Northern Forum 2020 (September 29—30, 2020, Yakutsk) and the International Online Scientific Summer School 2020 (July 6—20, 2020, Yakutsk).* Yakutsk, 2020, pp. 107—114. (In Russ.)
79. Kunitskaya O. A. Trends in the development of the timber industry complex of the Republic of Sakha (Yakutia). *Herald of AGATHU*, 2022, no. 2 (6), pp. 70—79. (In Russ.)
80. Shirnin Yu. A., Grigorev I. V., Nikiforova A. I., Nikiforov A. A. *Forest resource studies. Textbook for university students studying in the direction of preparation of certified bachelors in the direction 250400.62 «Technology of logging and wood processing industries» in the*

- profile «Forest engineering». Yoshkar-Ola, Publishing House Volga State Technological University, 2012. 355 p. (In Russ.)
81. Ternovskaya O. V., Platonov A. A. Modeling of classification features of forest rakes. *Forestry Journal*, 2021, vol. 11, no. 3 (43), pp. 172—182. (In Russ.)
82. Grigorev I. V., Tikhonov I. I., Kunitskaya O. A. *Technology and machines of logging operations. Textbook on course design for students of bachelor's degree courses 250400 «Technology of logging and wood processing industries» profile «Forest engineering»*. Saint Petersburg, SPbGLTU, 2013. 132 p. (In Russ.)
83. Zabortseva L. P. The role of the institute «KOMIGIPRONIILESPROM» in the mechanization of logging and logging operations (1950—80s). *Scientific readings. Collection of materials of the scientific and practical conference of the faculty of Syktyvkar Forest Institute based on the results of research work in 2008. Responsible editor V. V. Zhideleva. Responsible for the release of A. M. Popov*. Syktyvkar, 2009, pp. 203—206. (In Russ.)
84. Grigoreva O. I. Clearing of cutting areas from felling residues. *Logging. Business and profession*, 2015, no. 1, pp. 47—48. (In Russ.)
85. Grigorev I. V., Grigoreva O. I. Promising directions for improving the quality of training of specialists in the field of forest management. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 2-2 (13-2), pp. 205—208. (In Russ.)
86. Grigorev I. V., Grigoreva O. I. Practice of training operators of forest machines in Russia. *Innovations in the chemical and forestry complex: trends and prospects of development. Materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. Responsible editors Yu. A. Bezrukikh, E. V. Melnikova*. Krasnoyarsk, 2017, pp. 182—185. (In Russ.)
87. Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Motovilov A. I., Seryakov S. A. Evaluation of measures aimed at improving the working conditions of personnel at logging and forestry operations. *Safety and labor protection in logging and woodworking industries*, 2022, no. 6, pp. 51—60. (In Russ.)
88. Kunitskaya O. A., Makuev V. A., Storodubtseva T. N., Kalita G. A., Revyako S. I., Timokhov R. S. Problems of improving the quality of domestic forest engineering. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 4 (56), pp. 57—63. (In Russ.)
89. Grigorev I. V. Modern problems of import substitution in forest engineering of the Russian Federation. *Innovations in the chemical-forest complex: trends and prospects of development. Materials of the All-Russian Scientific and practical Conference. Editors Yu. A. Bezrukikh, E. V. Melnikova*. Krasnoyarsk, 2022, pp. 165—169. (In Russ.)
90. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A. Promising directions of experimental design work in forest engineering. *Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the third All-Russian scientific and practical conference with international participation*. Petrozavodsk, 2017, pp. 53—56. (In Russ.)
91. Dobretsov R. Yu., Dmitriev A. S., Grigorev I. V. Problems and prospects of using machines with a half-track propulsion in the forest complex. *Bulletin of AGATU*, 2022, no. 4 (8), pp. 95—105. (In Russ.)
92. Karasev Yu. A., Markov V. A., Dmitriev A. S., Dolzhikov I. S., Yudilevich A. M. Prospects for further research on the improvement of tracked forest machines. *Resources and Technology*, 2023, vol. 20, no. 1, pp. 42—86. (In Russ.)
93. Zhukova A. I., Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Ledyeva A. S. *Easy Resource Management: Study guide*. In order. V. I. Patyakina. Saint Petersburg, Publishing House SPbGLTA, 2008. 215 p. (In Russ.)

94. Sunev V. S., Selyverstov A. A., Gerasimov Yu. Yu., Sokolov A. P. *In focus bio Apostille: construction, design, selection: study. Equipment.* Io Apostille: nie Lesa Finlandi Apostille, 2011. 143 p. (In Russ.)
95. Fokin S. V., Khramchenko A. V. Technical means, interchangeable in the clean-up in the extrarubok from the source forest in the working. *Up-to-date.directions of scientific empirereferencesliterature of the century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 9-2 (20-2), pp. 280—283. (In Russ.)
96. Fokin S. V., Chugoschkina A. V. Replacement of small-sized techniques in the collection and in the Apostille with in the urgrubok Middle Volga Loess forest. *Actualmentialshistory of scientific empirereferencesbibliography of the century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 9-2 (20-2), pp. 283—287. (In Russ.)
97. Grigoreva O. I. New machine for cleaning woodsec. *Up-to-date.directions of scientific empirereferencesliterature of the century: theory and practice*, 2014, vol. 2, no. 5-3 (10-3), pp. 96—99. (In Russ.)
98. Kunitskaya O. A., Pomiguyev A. V., Burmistrova D. D., Tikhonov E. A., Storodubtseva T. N. The result is canberransperimentaln wawrambh in canberranderzhhek briquetting forest sectionnn wawrabh in conditionyah lesn wawrabh terminal. *Forestry Journal*, 2021, vol. 11, no. 3 (43), pp. 109—120. (In Russ.)
99. Kunitskaya O. A., Pomiguyev A. V., Kalita E. G., Shvetsova V. V., Tikhonov E. A. Analysis of gas-generating systems in autonomously and autonomously. *Apostille*, 2021, vol. 18, no. 3, pp. 53—76. (In Russ.)
100. Kunickaya O., Pomiguyev A., Kruchinin I., Storodubtseva T., Voronova A., Levushkin D., Borisov V., Ivanov V. Analysis of modern wood processing techniques in timber terminals. *Central European Forestry Journal*, 2022, vol. 68, no. 1, pp. 51—59.

© Трушевский П. В., Куницкая О. А., Должиков И. С., Макуев В. А.,
Ревяко С. И., Григорьева О. И., 2023

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7303

УДК 674.81*667*738.2

Статья

Исследование влияния и распределения порошкообразного гидролизного лигнина в древесном наполнителе на эксплуатационные и эстетические характеристики пластика без применения связующего

Артёмов Артём Вячеславович

кандидат технических наук, доцент, Уральский государственный лесотехнический университет (Российская Федерация), artemovav@m.usfeu.ru

Бурындин Виктор Гаврилович

доктор технических наук, профессор, Уральский государственный лесотехнический университет (Российская Федерация), buryndinv@gmail.com

Ершова Анна Сергеевна

аспирант, Уральский государственный лесотехнический университет (Российская Федерация), ershovaas@m.usfeu.ru

Захаров Павел Сергеевич

аспирант, Уральский государственный лесотехнический университет (Российская Федерация), zaharovps@m.usfeu.ru

Получена: 25 августа 2023 / Принята: 30 ноября 2023 / Опубликовано: 14 декабря 2023

Аннотация: В данной работе изучены композиции, изготовленные в различных соотношениях из порошкообразного гидролизного лигнина и древесных наполнителей (опилки сосны и берёзы). Исследуемые композиции предлагаются к использованию с целью получения пластика без связующих веществ. Обнаружено влияние содержания гидролизного лигнина на эксплуатационные и эстетические свойства получаемого пластика при его распределении в древесном наполнителе с последующей пьезотермической обработкой. Были установлены рациональные композиции исходного пресс-сырья, обеспечивающие необходимое соотношение эксплуатационных показателей, таких как прочность при изгибе и водопоглощение за 24 ч. Оценка эстетических показателей изготовленных материалов была выполнена с использованием сканографий

и с помощью анализа получаемых цветовых моделей. Результаты анализа цветовых и бинарных изображений образцов из различных композиций, как лицевой поверхности, так и внутреннего продольного среза, показали, что не получается достигнуть полной дифференциации порошкообразного гидролизного лигнина в древесном наполнителе. Механическое распределение колерующего агента в полученной композиции не позволяет получать однотонные цветные изделия. Установлено, что неравномерность распределения оказывает влияние на эксплуатационные свойства получаемого пластика.

Ключевые слова: пластики; отходы деревообработки; гидролизный лигнин; эксплуатационные свойства; пигмент; цветовая характеристика

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7303

Article

The influence and distribution of powdered hydrolytic lignin in wood filler on the operational and aesthetic characteristics of binderless plastic

Artyom Artyomov

Ph. D. in engineering, associate professor, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), artemovav@m.usfeu.ru

Viktor Buryndin

D. Sc. in engineering, professor, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), buryndinv@m.usfeu.ru

Anna Ershova

Ph. D. student, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), ershovaas@m.usfeu.ru

Pavel Zakharov

Ph. D. student, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), zaharovps@m.usfeu.ru

Received: 25 August 2023 / Accepted: 30 November 2023 / Published: 14 December 2023

Abstract: This study explored compositions of powdered hydrolysis lignin and wood fillers (pine and birch sawdust) made in various proportions. The studied compositions were proposed for use in the production of binderless plastic. The influence of hydrolysis lignin content on the operational and aesthetic properties of the resulting plastic was revealed when it was distributed within the wood filler followed by piezothermal treatment. Rational compositions of the pre-densified raw materials were determined to achieve the desired balance of performance indicators such as bending strength and water absorption during 24 hours. Aesthetic evaluation of the materials was performed using scanned images and analysis of obtained color models. The analysis of color and binary images of top surface and internal longitudinal cross-sections of samples made of various compositions revealed challenges in achieving complete differentiation of powdered hydrolysis lignin within the wood filler. Such circumstances of mechanical distribution of the coloring agent in the composition prevent the

attainment of monochrome colored products. This non-uniform distribution throughout the product volume also impacts the operational properties of the resulting plastic.

Keywords: plastics; woodworking waste; hydrolysis lignin; performance properties; pigment; color characteristics

1. Введение

Сегодня для придания цветовых оттенков материалам на основе древесных композитов широко используются красители (колоранты) и пигменты [1—3].

Красители представляют собой добавки в виде веществ, которые растворяются в полимерной композиции и достигают соответствующего цветового оттенка будущего изделия. Пигменты являются мелкодисперсными порошками, которые только механически распределяются в композиции, образуя двухфазную систему с полимером или наполнителем.

При производстве полимерно-композиционных материалов на основе термопластичных полимеров (такие как ПЭ, ПВХ, ПП) обычно используются полимеры нужного цветного оттенка с добавлением соответствующего красителя для достижения необходимой окраски и улучшения внешнего вида получаемого изделия [4—6].

В качестве наполнителя для получения древесных композиционных материалов используют различное лигноцеллюлозное сырьё (древесина в виде опилок и муки, растения в виде плодовых оболочек, волокна или костры, отходы текстиля и макулатуры), которое при различных способах и условиях переработки может влиять на конечную цветовую окраску получаемого изделия.

Установлена [7] возможность однородного окрашивания порошковыми неорганическими пигментами (2,5 % от общего 100 %-го состава пресс-материала) полимерного композиционного материала на основе жидких резольных фенолоформальдегидных смол и дисперсного волокнистого наполнителя, полученного механической переработкой отходов фибрового производства целлюлозно-бумажной промышленности. Изготовленные образцы изучаемого композита имели чёрный, малиновый и зелёный цвета с гладкой блестящей фактурой их поверхности.

В работе [8] приведены спектральные кривые отражения наиболее часто используемых бумаги и картонов различных сортов и производителей. Все изученные спектральные кривые имеют одинаковый характер изменения интенсивности отражения от длины волны, при этом они не совпадают друг с другом. Это свидетельствует о том, что изменения цветового оттенка готовой продукции (мелованная бумага, картон с мелованными слоями, бумага ВХИ) относятся исключительно к технологии их изготовления [9].

В другом исследовании [10] с целью идентификации микропластика (пластиковых фрагментов) в окружающей среде (в водной толще, донных отложениях, почвах, льдах) предлагается использование липофильного красителя Нильский красный. Применение данного красителя в сочетании с флуоресцентной микроскопией хорошо подходит для визуального отделения пластика от биологических остатков.

В процессе получения композиционных материалов используемый наполнитель (в большинстве случаев древесный) может подвергаться воздействиям технологических факторов, которые могут вызывать изменения его внешнего вида, и, как следствие, может сказываться на конечном цветовом оттенке получаемого изделия.

Например, на сегодняшний день растительный наполнитель широко применяется в 3D-печати [11], [12]. В работе [13] представлены результаты исследований, которые показали, что температура печати на 3D-принтере оказывает влияние на ряд физических свойств формируемого материала, а также на его цвет. Авторы связывают изменение цвета с деградацией самого древесного вещества при высокой температуре.

Данное предположение подтверждается работой [14]. Было выяснено, что термическое воздействие на древесину в интервале температур от 160 до 210 °C без доступа кислорода приводит к значительному изменению цветовых свойств материала: повышение температуры обработки вызывает заметное потемнение древесины. И это, в конечном счёте, ведёт к изменению эксплуатационных и цветовых характеристик получаемого композита.

Также для прогнозирования цвета итогового изделия авторами работы [15] была предложена регрессионная математическая модель, которая выведена в результате цветового анализа композитов на основе PLA и базируется на цветовом коде RYB. Предложенная математическая модель, задавая температуру обработки древесного наполнителя, позволяет прогнозировать интенсивности красного, жёлтого и синего составляющих для последующего визуального представления цвета конечного композитного состава.

В работе [16] измерение цвета предлагается даже для прямого химического анализа. Исследование проводилось с использованием УФ-облучения древесных поверхностей, и авторы высказывают предположение о том, что измерение цвета является достоверным инструментом для оценки изменений химической структуры поверхности древесины.

Получение пластика без связующих веществ (ПБС) на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья возможно только при его пьезотермической обработке в пространственно-замкнутых условиях. Исходя из анализа литературных данных, на цветовой оттенок получаемого материала на основе ПБС могут повлиять следующие условия и технологические факторы получения:

- Влажность исходного пресс-сырья при получении пьезотермопластиков (ПТП) [17].

ПТП, запрессованные при оптимальной влажности для принятого давления (и прочих оптимальных условиях), имеют тёмный цвет по всей площади, за исключением узкой светлой кромки по периферии: светлая кромка (зона брикета). Снижение влажности исходного материала приводит к сокращению размера потемневшей части плиты [17].

- Прессование между плоско-параллельными плитами при получении лигноуглеводных древесных пластиков (ЛУДП) [18].

Отпрессованные ЛУДП имеют центральную кондиционную часть более тёмного цвета (от светло-коричневого до тёмно-коричневого цвета) и светлую кромку по периферии — некондиционную часть плиты. При прессовании плит в открытых пресс-формах материал периферийной части плиты подвергается только температурной обработке [19].

- Производство цветных плиток из древесных опилок без введения связующего и красителей [20—24]. Получение данных изделий заключается в предварительной обработке перед прессованием древесного наполнителя в виде опилок специальными

химическими реактивами (в зависимости от цвета, который необходимо придать получаемой плитке). Перечень химических реактивов и получаемый цвет готового изделия представлены в таблице 1.

Таблица 1. Химические вещества для получения цветных плиток без связующих

Table 1. Chemicals for the production of colored binderless tiles

№ п/п	Наполнитель	Химический реагент	Цвет получаемого пластика	Источник литературы
1	Древесные опилки	3 %-й водный раствор гидрохинона с добавлением 10 %-го раствора серной кислоты	Чёрно- коричневый	[19]
2	Смесь опилок лиственных и хвойных пород	3 %-й водный раствор сернокислого гидроксиламина	Тёмно- коричневый	[20]
3	Смесь опилок лиственных и хвойных пород	3 %-й водный раствор сернокислого гидрозина с добавлением до 2 %-го технического фурфурола	Ярко-оранжевый	[21]
4	Смесь опилок лиственных и хвойных пород	5 %-й водный раствор солянокислого анилина	Жёлто- коричневый	[22]
5	Древесные опилки	3 %-й водный раствор солянокислого анилина с добавлением до 2 %-го технического фурфурола	Ярко-красный (от светло- красного до тёмно- красного)	[23]
6	Смесь опилок лиственных и хвойных пород	3 %-й водный раствор сернокислого гидроксиламина с добавлением до 2 %-го технического фурфурола	Светло-жёлтый	[24]

Использование химических реагентов при производстве ПБС оказывает воздействие не только на конечный продукт (эксплуатационные свойства, в т. ч. цветовой оттенок), но и позволяет проводить процесс получения ПБС в более благоприятных условиях прессования (при более низкой температуре и давлении прессования).

Однако использование химических модификаторов приводит к удорожанию получаемого пластика, усложняет технологический процесс получения. В связи с этим возникает потребность в поиске иных способов модификации древесного пресс-сырья с целью получения высокоэксплуатационных материалов, при этом обладающих определёнными эстетическими свойствами и характеристиками — цветом и текстурой. В то же время это не должно приводить к ухудшению эксплуатационных свойств и удорожанию получаемого материала.

Наиболее перспективным сырьём для рассматриваемой задачи может являться отход в виде гидролизного лигнина. Гидролизный лигнин является крупнотоннажным отходом целлюлозно-бумажной и гидролизной промышленности и широко применяется

при получении композиционных материалов [25—27], в т. ч. ПБС, где используется в качестве модификатора [28], [29].

Целью данной работы являлось изучение влияния на физико-механические (эксплуатационные) свойства и цветовые (эстетические) характеристики ПБС на основе древесного наполнителя с добавкой мелкодисперсного гидролизного лигнина, выступающего одновременно модификатором и колерующим агентом.

2. Материалы и методы

В качестве исходного сырья использовалось пресс-сырьё на основе древесного наполнителя (ДН) в виде отходов деревообработки [сосновые опилки (СО) и берёзовые опилки (БО)] и гидролизного лигнина (ГЛ). Для выполнения исследования и возможности оценки влияния добавки гидролизного лигнина на свойства ПБС были получены образцы ПБС из составленного ряда композиций из различных соотношений «древесный наполнитель — гидролизный лигнин». Рецептура пресс-композиций, технологические режимы и условия получения образцов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Рецептура и режимы получения образцов плиток без связующих

Table 2. Formulation and modes of obtaining samples of binderless tiles

№ композиции	Содержание, масс.%,		Влажность, %	Давление прессования, МПа	Температура прессования, °С	Продолжительность, мин	
	ДН	ГЛ				прессования	охлаждения под давлением
1	100	0	12	40	180	10	10
2	80	20	12	40	180	10	10
3	60	40	12	40	180	10	10
4	40	60	12	40	180	10	10
5	20	80	12	40	180	10	10
6	0	100	12	40	180	10	10

На основании принятых композиций и режимов изготовления методом горячего компрессионного прессования были получены образцы ПБС в виде дисков диаметром 90 мм и толщиной 2,5 мм. Полученные образцы перед испытаниями подвергались кондиционированию в комнатных условиях в течение 24 ч.

Испытания на физико-механические свойства (плотность, прочность при изгибе, водопоглощение по объёму за 24 ч) осуществлялись на поверенном оборудовании (разрывная машина модели «РМ-5-1») в соответствии с ГОСТ 10634-88, ГОСТ 4650-2014.

Изучение изменения цветовой окраски лицевой поверхности полученных образцов ПБС осуществлялось с помощью сканографий. Сканографии были получены с помощью планшетного сканера с CCD-матрицей при разрешении 300 dpi.

Анализ цветовых моделей полученных изображений осуществлялся с помощью программы для обработки растровых изображений (программа для графического дизайна CorelDRAW Graphics Suite 2020) и онлайн сервисов для обработки растровых изображений с целью подбора красок и колеров (<https://whatcolor.ru/>). Для выполнения анализа произвольно выбирались не менее 5 точек (размер точки анализа принимался от 16 до 50 px), для которых выполнялось определение цветовой модели (RGB), шестнадцатеричного кода цвета и устанавливалась доля преобладающего (доминирующего) цвета в изучаемом образце.

Обработка и анализ изображений с целью установления распределения частиц пигмента в древесном наполнителе производились с использованием программы ImageJ (программное обеспечение с открытым исходным кодом для обработки и анализа научных изображений).

3. Результаты и обсуждение

Статистически обработанные результаты испытаний на физико-механические свойства полученных образцов ПБС представлены на рисунке 1. Так как показатели прочности при изгибе и водопоглощении зависят от плотности образцов ПБС, они были приведены к единой плотности по зависимостям, представленным в работе [30]. За единую плотность была принята плотность образцов ПБС, полученных только на основе древесного наполнителя.

С целью определения рационального содержания гидролизного лигнина в древесном наполнителе для получения ПБС с физико-механическими свойствами, которые бы сочетали в себе относительно высокие показатели по прочности при изгибе и минимальное водопоглощение, была выполнена математическая структурная оптимизация с использованием полученных уравнений зависимостей (см. рисунок 1).

Определение рационального содержания лигнина выполнялось по возможно допустимому снижению показателя прочности при изгибе. Для древесно-композиционных материалов предельная остаточная величина прочности при изгибе от исходной (начальной) величины составляет 80—90 % [31], [32]. Используя полученные уравнения и принятое допустимое снижение прочности при изгибе на 20 %, были определены следующее рациональное содержание гидролизного лигнина в древесном наполнителе и прогнозируемые свойства:

- На основе БО: содержание гидролизного лигнина составляет 25 %, прочность при изгибе — 8,4 МПа, водопоглощение за 24 ч — 45 %.
- На основе СО: содержание лигнина составляет 26 %, прочность при изгибе — 10,2 МПа, водопоглощение за 24 ч — 41 %.
- Результаты анализа цветовых характеристик полученных изображений представлены в таблице 3.
- Анализ точек размером 50 px позволяет получать информацию о преобладающем цвете лицевой поверхности образцов более 50 %. При анализе точек с минимальным размером 16 px приводит к идентификации цвета с минимальной

долей. Это можно объяснить тем, что размеры частиц наполнителя и пигмента соответствуют определённым размерам.

- Для установления размера частиц пигмента и его распределения на поверхности образца при его получении сканографии были обработаны с целью получения бинарных изображений.

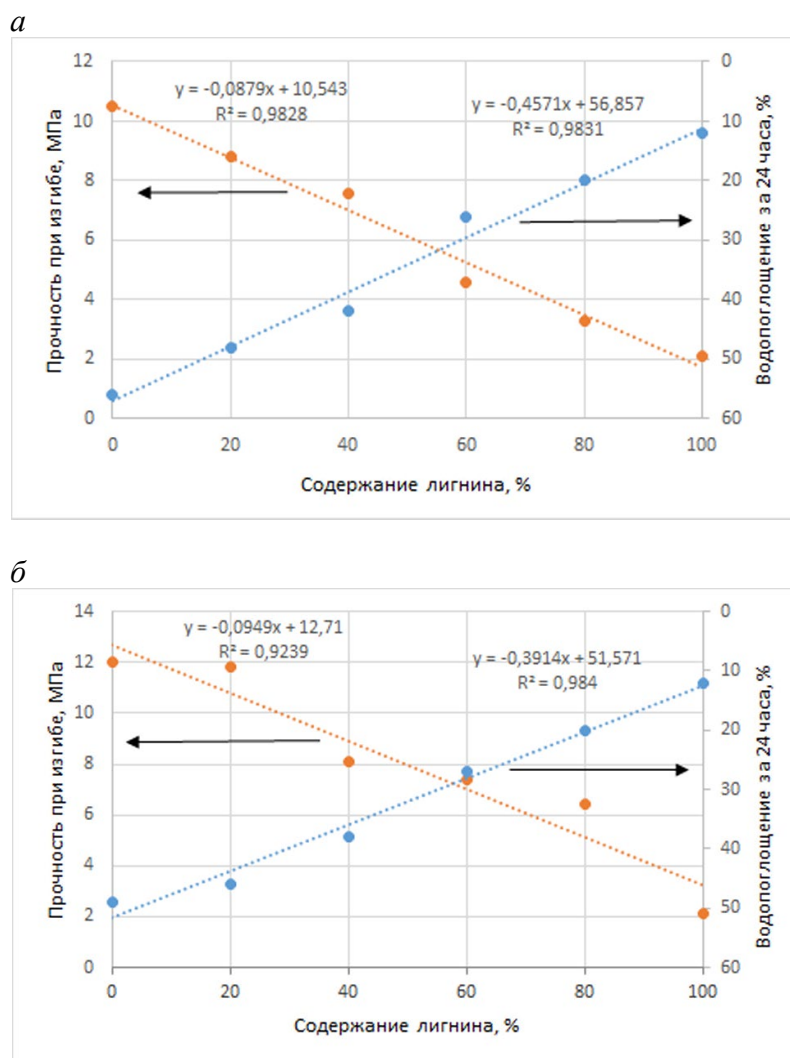

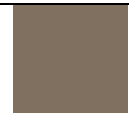

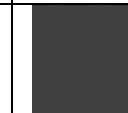
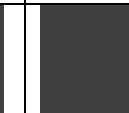
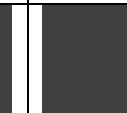

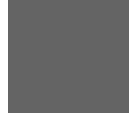







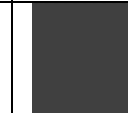
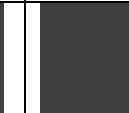




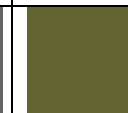
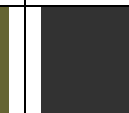
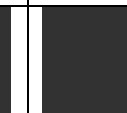


Рисунок 1. Физико-механические свойства ПБС на различном древесном наполнителе в зависимости от содержания пигмента (гидролизного лигнина): *a* — на основе БО; *б* — на основе СО

Figure 1. Physical and mechanical properties of PWR made with various wood fillers depending on the pigment content (hydrolytic lignin): (a) birch sawdust-based; (b) pine sawdust-based

Таблица 3. Анализ цветовых характеристик сканографий образцов ПБС на основе различных древесных наполнителей и содержания ГЛ








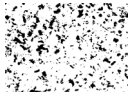
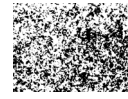
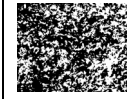
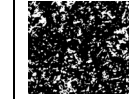

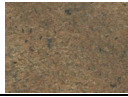



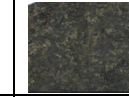

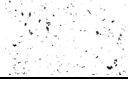





Table 3. Analysis of color characteristics of PWR sample scans made with various wood fillers and hydrolytic lignin content

Наполнитель, размер точки (px)	Показатели	Содержание «наполнитель ÷ пигмент», %					
		100÷0	80÷20	60÷40	40÷60	20÷80	0÷100
БО, 16	Шестнадцатеричный код цвета	#a09070	#807060	#505040	#404040	#404040	#404040
	Шаблонный цвет						
	Доля цвета, %	38	49	42	57	52	94
БО, 50	Шестнадцатеричный код цвета	#969664	#646464	#646432	#323232	#323232	#323232
	Шаблонный цвет						
	Доля цвета, %	100	72	53	68	60	98
СО, 16	Шестнадцатеричный код цвета	#807050	#908060	#706050	#404040	#404040	#404030
	Шаблонный цвет						
	Доля цвета, %	47	30	52	34	73	63
СО, 50	Шестнадцатеричный код цвета	#966464	#969664	#646464	#646432	#323232	#323232
	Шаблонный цвет						
	Доля цвета, %	100	95	80	60	79	100

Результаты бинарной обработка полученных цветных изображений представлены в таблице 4.

Таблица 4. Анализ цветовых характеристик сканографий образцов ПБС на основе различных древесных наполнителей и содержания ГЛ

Table 4. Analysis of color characteristics of PWR sample scans made with various wood fillers and hydrolytic lignin content

Наполнитель	Показатели	Содержание «наполнитель ÷ пигмент», %					
		100÷0	80÷20	60÷40	40÷60	20÷80	0÷100
БО	Сканография						
	Бинарное изображение						
	Доля частиц наполнителя, %	99,6	84,2	60,3	38,4	20,6	2,1
	Средний размер частиц пигмента*/наполнителя**, рх	28*	38*	55*	62**	39**	22**
СО	Сканография						
	Бинарное изображение						
	Доля частиц наполнителя, %	99,6	81,0	60,0	39,9	19,6	2,1
	Средний размер частиц пигмента*/наполнителя**, рх	28*	37*	52*	61**	40**	22**

Полученные данные по доле частиц наполнителя и добавки пигмента бинарных изображений с помощью программы ImageJ показали высокую сходимость их изначального содержания. Незначительные расхождения композиций со 100 %-м содержанием наполнителя или добавки можно обосновать содержанием в древесном наполнителе коры древесины (композиция № 1 и № 6) и определённой доли небольших вмятин и углублений (композиция № 6).

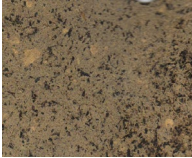

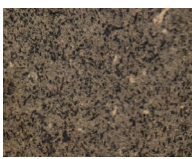
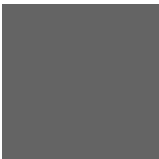
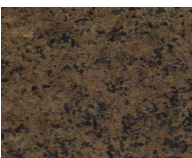
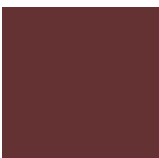
По размеру частиц можно судить о том, насколько точно будет определён цвет исследуемой поверхности: чем меньше размером точка анализа сканографии поверхности образца, тем более точно будет определён цвет. При анализе растрового изображения поверхности ПБС на основе порошкообразного наполнителя и пигмента, которые образуют неравномерную цветовую поверхность (см. таблицу 4) и требуют обобщённую картину для общего формирования цветовой модели (см. таблицу 3), возможно использование точек большего размера. Рекомендуемый размер точек анализа должен быть не меньше размеров самих частиц наполнителя и/или пигмента.

С целью исследований возможного распределения частиц колерующей добавки по всему объёму пресс-материала были получены сканографии внутреннего среза поверхности образцов материала.

Результаты сканографий лицевой и задней поверхностей, а также внутреннего среза по всей поверхности образца ПБС представлены в таблице 5.

Таблица 5. Графические изображения поверхностей и внутреннего среза поверхности образцов ПБС (БО, композиция № 3)

Table 5. Graphic images of the surface and the inner surface cut of the samples of PWR (birch sawdust, composition No. 3)

Поверхность образца	Сканография (px 50)	Цветовая модель	Шестнадцатеричный код цвета	Доля преобладающего цвета, %
Внешняя (лицевая)			#646432	54
Внутренняя			#64646	72
Внешняя (задняя)			#643232	100

Наблюдается изменение цветовой окраски по всей толщине образцов ПБС, которое можно объяснить различной насыпной плотностью древесного наполнителя и гидролизного лигнина. Так, например, для древесных опилок она составляла в пределах $160 \div 220 \text{ кг/м}^3$, а для гидролизного лигнина — 320 кг/м^3 . За счёт различной насыпной плотности порошкообразных составляющих пресс-сырья происходит разное распределение частиц по всему объёму получаемых материалов на основе ПБС. При этом внутри самого материала не наблюдается совместного «плавления» частиц древесины и лигнина и образования монолитного материала. Это говорит о том, что при заданных параметрах пьезотермической обработки данные компоненты пресс-сырья не вступают в химическое взаимодействие между собой, а происходит физическое «спекание» и образуется двухфазная система. Изменение окраски происходит благодаря потемнению древесины (за счёт термической деструкции её компонентов) и механического распределения частиц в наполнителе колерующего агента.

На основании полученного шестнадцатеричного кода цвета были определены цветовые модели в формате RGB и выполнена их аппроксимация с целью выявления корреляционной зависимости интенсивности цвета лицевой поверхности ПБС от содержания ГЛ в древесном наполнителе. Уравнения зависимостей и результаты аппроксимации представлены в таблице 6.

Таблица 6. Установленные зависимости влияния пигментной добавки (ГЛ) на цветовую окраску ПБС

Table 6. The dependences of the effect of a pigment additive (hydrolytic lignin) on the color coloration of PWR

Наполнитель, размер точки (px)	Цвет		
	R	G	B
БО, 16	$Y = 142,03e^{-0,01x}$	$Y = 127,74e^{-0,009x}$	$Y = 100,13e^{-0,006x}$
	$R^2 = 0,8357$	$R^2 = 0,8487$	$R^2 = 0,7142$
БО, 50	$Y = 136,53e^{-0,012x}$	$Y = 136,53e^{-0,012x}$	$Y = 93,612e^{-0,008x}$
	0,8571	0,8571	0,6857
СО, 16	$Y = 143,18e^{-0,009x}$	$Y = 123,05e^{-0,008x}$	$Y = 92,246e^{-0,007x}$
	0,8036	0,7978	0,7381
СО, 50	$Y = 162,4e^{-0,011x}$	$Y = 131,32e^{-0,008x}$	$Y = 111,27e^{-0,009x}$
	0,8232	0,5786	0,7902





Полученные уравнения имеют достаточно высокий коэффициент аппроксимации, что допускает использование данных уравнений для прогнозирования цветового оттенка при использовании в определённой пропорции гидролизного лигнина к древесному наполнителю.

С целью подтверждения полученных закономерностей были получены образцы ПБС с рациональными свойствами (см. рисунок 1) и произведены оценка и сопоставление расчётных и экспериментальных показателей по цветовым моделям и физико-механическим характеристикам. Результаты испытаний представлены в таблице 7.

Согласно таблице 7, наблюдается существенное расхождение показателей по цвету В (для БО расхождение составляет 35 %, для СО — 23 %). Такое смещение в сторону жёлтого цвета объясняется наибольшим содержанием наполнителя — чистые древесные опилки преимущественно оттенков жёлтого цвета (см. таблицу 3) — и неоднородностью компонентов композиции, не обеспечивающих гомогенизацию пресс-сырья (см. таблицу 5).

Таблица 7. Расчётные и экспериментальные характеристики ПБС, полученные по рациональной композиции

Table 7. Calculated and experimental characteristics of PWR obtained by using a rational composition

Наполнитель	Содержание добавки, %	Показатели	Расчётные		Экспериментальные	
БО	25	R	101	#65654d Нефритовый с сильными оттенками елового и авокадо 	100	#646432 Авокадо 
		G	101		100	
		B	77		50	
		Прочность при изгибе, МПа		8,4	8,6	
		Водопоглощение за 24 ч, %		45	48	
СО	26	R	122	#7a6a58 Почти нефритовый с оттенками какао и елового 	122	#7a6644 Светлое авокадо с сильными оттенками какао и нефрита 
		G	106		102	
		B	88		68	
		Прочность при изгибе, МПа		10,2	9,2	
		Водопоглощение за 24 ч, %		41	35	

4. Заключение

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Возможно использование гидролизного лигнина в качестве цветового пигмента для улучшения декоративных характеристик с целью получения отделочных и декоративных изделий на основе ПБС. Такой подход позволяет получать готовые материалы с определённой номенклатурой цветовых гамм без использования дорогостоящей стадии химической обработки исходного пресс-сырья. С помощью стандартных компьютерных программ и свободных приложений и утилит (*free software*) было оценено визуальное представление цвета, полученных образцов ПБС на основе древесного сырья с различным содержанием гидролизного лигнина.

2. Показано, что добавка гидролизного лигнина выполняет функции пигмента при получении ПБС. Из-за низкой смешиваемости не удаётся получать материал, имеющий единообразную и монотонную поверхность. Это объясняется тем, что гидролизный лигнин не выступает как полноценный химический модификатор (не происходит глубокого химического взаимодействия между ним и древесным наполнителем). Изменение содержания гидролизного лигнина в древесном наполнителе ведёт к изменению цветовых характеристик получаемого ПБС.

3. Цветовой анализ растровых изображений сканографий с анализом точек с размером 50 рх позволяет с высокой степенью вероятности предопределять долю доминирующего цвета исследуемого материала. Для оценки и установления цветовых моделей не рекомендуется анализ сканографий с размером точек менее 50 рх, т. к. отсутствует возможность получения однозначной цветовой модели из-за размера частиц наполнителя и пигмента и присутствия структурно-механического фактора.

4. Установленные закономерности влияния пигментной добавки (ГЛ) на цветовую окраску ПБС на основе древесного наполнителя позволяют с высокой степенью спрогнозировать не только цветовой оттенок получаемого изделия, но и его физико-механические свойства. Однако данные зависимости не учитывают исходный цвет древесного наполнителя, его начальную влажность и условия его пьезотермической обработки. Для удобства прогнозирования цвета конечного изделия на основе ПБС необходима разработка методики прогнозирования цвета в зависимости от содержания в пресс-композиции гидролизного лигнина, которая позволит определять конечную цветовую гамму.

Список литературы

1. Юрченко В. В., Хлебородова В. А. Анализ модифицирующих добавок, применяемых в композиционных материалах с наполнителем из отходов древесины и термопластичных полимеров // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. 2018. № 48. С. 39—45. EDN LBBTVB.
2. Nanocolorants: A novel class of colorants, the preparation and performance characterization / Zh. Hu, M. Xue, Q. Zhang [et al.] // *Dyes and Pigments*. 2008. Vol. 76, no. 1. P. 173—178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.08.026>.
3. Bashkirova K. A., Gazeev M. V., Sviridov A. V. Features of planning an experiment to develop a new paint and varnish composition for the formation of protective and decorative coatings on wood products // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Yekaterinburg, 15—16 октября 2021 г. Yekaterinburg, 2022. P. 012065. DOI: 10.1088/1755-1315/949/1/012065. EDN BMMKZR.
4. Becker D. Coloring of Plastics // *Color Trends and Selection for Product Design*. 2016. P. 195—198. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39395-9.00040-2>.
5. Кузьмин А. М., Водяков В. Н., Котина Е. А. Модификация термопластичных композитов с растительным наполнителем минеральными тонкодисперсными частицами // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20, № 2. С. 74—77. EDN XVFSST.

6. Константинова С. А., Щелоков В. М., Воскобойников И. В. Получение целлюлозосодержащего полимерного суперконцентрата для производства древесно-полимерных композиционных материалов // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2012. № 8. С. 117—124. EDN NRIJLX.
7. Гусев Е. В., Набойщикова Н. А., Агеева Т. А. Закономерности изменения физико-механических свойств композитов на основе жидких фенолоформальдегидных смол и дисперсно-волокнутого наполнителя // Российский химический журнал. 2022. Т. 66, № 2. С. 22—27. DOI: 10.6060/rcj.2022662.4. EDN IQEFHC.
8. Тарасов Д. А., Тягунов А. Г. Анализ спектров отражения печатных бумаг и картонов // Полиграфия: технология, оборудование, материалы: Материалы IX научно-практич. конф. с междунар. участием, Омск, 15—16 мая 2018 г. / Минобрнауки России, ОмГТУ; Ред. коллегия: С. Н. Литунов (науч. ред.), И. А. Сысуев (отв. ред.), В. М. Вдовин. Омск: ОмГТУ, 2018. С. 129—134. EDN XRGDNB.
9. Вураско А. В., Агеев М. А., Агеев А. Я. Технологии получения, обработки и переработки бумаги и картона / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. гос. лесотехн. ун-т. Изд. 2-е, доп. и перераб. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2021. 276 с. EDN BOLFHQ.
10. Особенности применения красителя Нильский красный для идентификации частиц пластика в природных объектах / Е. В. Иванова, А. В. Гузева, А. Е. Лапенков [и др.] // Российский журнал прикладной экологии. 2020. № 4 (24). С. 36—42. DOI: 10.24411/2411-7374-2020-10032. EDN CSUQUD.
11. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective / X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou [et al.] // Composites Part B: Engineering. 2017. Vol. 110. P. 442—458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.
12. COLOR3D — Multicolored 3D printing of wood composites by submicron structuring / Y. Li, S. Kluck, N. Nekoonam [et al.] // Additive Manufacturing. 2023. Vol. 75. P. 103723. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103723>.
13. Говядин И. К., Чубинский А. Н. Исследование влияния температуры на 3D-принтере на свойства древесно-полимерной нити // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. № 229. С. 231—242. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.229.231-242. EDN HIDXJC.
14. Impact of thermal modification on color and chemical changes of spruce and oak wood / A. Sikora, F. Kačík, M. Gaff [et al.] // Journal of Wood Science. 2018. No. 64. P. 406—416. DOI: 10.1007/s10086-018-1721-0.
15. Математическая модель прогнозирования цветовых характеристик древесно-наполненных композитов на основе PLA / Г. А. Сабирова, Н. Р. Галяветдинов, Р. З. Хайруллин [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. 2021. № 1. С. 82—89. EDN QXOKMF.
16. Modeling color and chemical changes on normal and red heart beech wood by reflectance spectrophotometry, Fourier Transform Infrared spectroscopy and hyperspectral imaging / G. Bonifazi, L. Calienno, G. Capobianco [et al.] // Polymer Degradation and Stability. 2015. Vol. 113. P. 10—21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.01.001>.
17. Минин А. Н. Технология термопьезопластиков. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 296 с.
18. Плитные материалы и изделия из древесины и других одревесневевших остатков без добавления связующих / А. С. Аккерман, В. Н. Антакова, В. Е. Бабайлов [и др.]; Под ред. В. Н. Петри. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 360 с.

19. А. с. № 142413 А1 СССР, МПК В27N 3/02. Способ изготовления цветного древесного пластика из опилок без связующего: № 724027; заявл. 30.03.1961; опубл. 01.01.1961 / А. В. Чуйко, Е. С. Чуйко. EDN FDGOKQ.
20. А. с. № 142014 А1 СССР, МПК В27N 3/02. Способ изготовления цветного древесного пластика из опилок без связующего: № 724024; заявл. 30.03.1961; опубл. 01.01.1961 / А. В. Чуйко, Е. С. Чуйко. EDN KAIPYL.
21. А. с. № 142015 А1 СССР, МПК В27N 3/02. Способ изготовления цветных плиток из древесных опилок без связующего: № 724025; заявл. 30.03.1961; опубл. 01.01.1961 / А. В. Чуйко, Е. С. Чуйко. EDN WWQVSP.
22. А. с. № 142016 А1 СССР, МПК В27N 3/02. Способ изготовления цветного древесного пластика из опилок без связующего: № 724026; заявл. 30.03.1961; опубл. 01.01.1961 / А. В. Чуйко, Е. С. Чуйко. EDN OTVXCL.
23. А. с. № 142017 А1 СССР, МПК В27N 3/02. Способ изготовления цветных плиток из древесных опилок без введения связующего: № 724028; заявл. 30.03.1961; опубл. 01.01.1961 / А. В. Чуйко, Е. С. Чуйко. EDN SXIKIS.
24. А. с. № 142018 А1 СССР, МПК В27N 3/02. Способ изготовления цветных плиток из древесных опилок без связующего: № 724029; заявл. 30.03.1961; опубл. 01.01.1961 / А. В. Чуйко, Е. С. Чуйко. EDN GKUYFP.
25. Жуланова А. Е., Глушанкова И. С. Утилизация лигносульфонатов с получением композиционных строительных материалов // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 134—139. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-1-134-139. EDN SPORXT.
26. Ступак Д. П., Шкуро А. Е., Артемов А. В. Получение и исследование свойств древесно-полимерных композитов с гидролизным лигнином // Деревообрабатывающая промышленность. 2020. № 1. С. 72—80. EDN CNXUXS.
27. Влияние лигнина на реакционную способность фенолформальдегидной смолы и свойства теплоизоляционного материала на её основе / И. В. Тычинкин, О. Ф. Шишлов, В. В. Глухих [и др.] // Клеи. Герметики. Технологии. 2022. № 8. С. 8—14. DOI: 10.31044/1813-7008-2022-8-8-14. EDN GHSXMQ.
28. Савиновских А. В., Артемов А. В., Бурындин В. Г. Влияние модификаторов на физико-механические свойства древесных пластиков без добавления связующих // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2016. Т. 20, № 3. С. 55—59. EDN WKNMON.
29. Гидрофобизация пластиков без связующих веществ гидролизным лигнином / А. В. Артемов, В. Г. Бурындин, А. С. Ершова [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. 2023. № 1. С. 116—124. EDN SABZOC.
30. Исследование зависимости между физико-механическими свойствами древесных пластиков / М. С. Гарт, А. С. Ершова, А. В. Артемов [и др.] // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: Труды XVII Междунар. Евразийского симпозиума, Екатеринбург, 13—16 сентября 2022 г. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2022. С. 140—146.
31. Хрулёв В. М., Мартынов К. Я. Долговечность древесностружечных плит. М., 1977. 168 с.
32. Тепловое старение изделий на основе древесных композиционных материалов / Т. С. Выдрина, А. В. Артемов, В. Г. Дедюхин [и др.] // Химия растительного сырья. 2007. № 2. С. 101—106. EDN IAPFVZ.

References

1. Yurchenko V. V., Khleborodova V. A. Analysis of modifying additives used in composite materials with filler from wood waste and thermoplastic polymers. *Collection of scientific papers of the Donetsk Institute of Railway Transport*, 2018, no. 48, pp. 39—45. EDN LBBTVB. (In Russ.)
2. Hu Zh., Xue M., Zhang Q. [et al.]. Nanocolorants: A novel class of colorants, the preparation and performance characteriza-tion. *Dyes and Pigments*, 2008, vol. 76, no. 1, pp. 173—178. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.08.026>.
3. Bashkirova K. A., Gazeev M. V., Sviridov A. V. Features of planning an experiment to develop a new paint and varnish composition for the formation of protective and decorative coatings on wood products. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Yekaterinburg, October 15—16, 2021*. Yekaterinburg, 2022, pp. 012065. doi: 10.1088/1755-1315/949/1/012065. EDN BMMKZR.
4. Becker D. Coloring of Plastics. *Color Trends and Selection for Product Design*, 2016, pp. 195—198. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39395-9.00040-2>.
5. Kuzmin A. M., Vodiakov V. N., Kotina E. A. Modification of thermoplastic composites with vegetable filler with mineral fine particles. *Bulletin of the Technological University*, 2017, vol. 20, no.2, pp. 74—77. EDN XVFSST. (In Russ.)
6. Konstantinova S. A., Shchelokov V. M., Voskoboynikov I. V. Obtaining a cellulose-containing polymer superconcenter-ata for the production of wood-polymer composite materials. *Bulletin of the Moscow State University of Forests — Forest Bulletin*, 2012, no. 8, pp. 117—124. EDN NRIJLX. (In Russ.)
7. Gusev E. V., Naboyshikova N. A., Ageeva T. A. Regularities of changes in the physical and mechanical properties of composites based on liquid phenol-formaldehyde resins and dispersed fiber filler. *Russian Chemical Journal*, 2022, vol. 66, no. 2, pp. 22—27. doi: 10.6060/rcj.2022662.4. EDN IQEFHC. (In Russ.)
8. Tarasov D. A., Tyagunov A. G. Analysis of reflection spectra of printed papers and cartons. *Polygraphy: technology, equipment, materials: Materials of the IX Scientific and practical conference with international participation, Omsk, May 15—16, 2018. Ministry of Education and Science of Russia, OmSTU; Editorial Board: S. N. Litunov (scientific editor), I. A. Sysuev (editor-in-chief), V. M. Vdovin*. Omsk, Omsk State Technical University, 2018, pp. 129—134. EDN XRGDNB. (In Russ.)
9. Vurasko A. V., Ageev M. A., Ageev A. Ya. *Technologies for obtaining, processing and processing paper and cardboard. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Ural State Forestry University. 2nd edition, supplemented and revised*. Yekaterinburg, Ural State Forestry University, 2021. 276 p. EDN BOLFHQ. (In Russ.)
10. Ivanova E. V., Guzeva A. V., Lapenkov A. E. [et al.]. Features of the use of the Nile red dye for the identification of plastic particles in natural objects. *Russian Journal of Applied Ecology*, 2020, no. 4 (24), pp. 36—42. doi: 10.24411/2411-7374-2020-10032. EDN CSUQUD. (In Russ.)
11. Wang X., Jiang M., Zhoub Z. [et al.]. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 2017, vol. 110, pp. 442—458. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.
12. Li Y., Kluck S., Nekoonam N. [et al.]. COLOR3D — Multicolored 3D printing of wood composites by submicron structuring. *Additive Manufacturing*, 2023, vol. 75, pp. 103723. doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103723>.

13. Govyadin I. K., Chubinsky A. N. Investigation of the effect of temperature on a 3D printer on the properties of a spring polymer thread. *Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy*, 2019, no. 229, pp. 231—242. doi: 10.21266/2079-4304.2019.229.231-242. EDN HIDXJC. (In Russ.)
14. Sikora A., Kačík F., Gaff M. [et al.]. Impact of thermal modification on color and chemical changes of spruce and oak wood. *Journal of Wood Science*, 2018, no. 64, pp. 406—416. doi: 10.1007/s10086-018-1721-0.
15. Sabirova G. A., Galyavetdinov N. R., Khairullin R. Z., Mukhametzyanov Sh. R. Mathematical model for predicting the color characteristics of wood-filled composites based on PLA. *Woodworking industry*, 2021, no. 1, pp. 82—89. EDN QXOKMF. (In Russ.)
16. Bonifazi G., Calienno L., Capobianco G. [et al.]. Modeling color and chemical changes on normal and red heart beech wood by reflection spectrophotometry, Fourier Transform Infrared spectroscopy and hyperspectral imaging. *Polymer Degradation and Stability*, 2015, vol. 113, pp. 10—21. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.01.001>.
17. Minin A. N. *Technology of thermopiezoplastics*. Moscow, Forest industry, 1965. 296 p. (In Russ.)
18. Akkerman A. S., Antakova V. N., Babailov V. E. [et al.]; Edited by V. N. Petri [et al.]. *Plate materials and products made of wood and other desalinated residues without the addition of binders*. Moscow, Forest industry, 1976. 360 p. (In Russ.)
19. Copyright certificate no. 142413 A1 of the USSR, IPC B27N 3/02. Method of manufacturing colored wood plastic from sawdust without binder: no. 724027; application 30.03.1961; publ. 01.01.1961. A. V. Chuiko, E. S. Chuiko. EDN FDGOKQ. (In Russ.)
20. Copyright certificate no. 142014 A1 USSR, IPC B27N 3/02. Method of manufacturing colored wood plastic from sawdust without binder: no. 724024; application 30.03.1961; publ. 01.01.1961. A. V. Chuiko, E. S. Chuiko. EDN KAIPYL. (In Russ.)
21. Copyright certificate no. 142015 A1 USSR, IPC B27N 3/02. Method of making colored tiles from sawdust without binder: no. 724025; application 30.03.1961; publ. 01.01.1961. A. V. Chuiko, E. S. Chuiko. EDN WWQVSP. (In Russ.)
22. Copyright certificate no. 142016 A1 USSR, IPC B27N 3/02. Method of manufacturing colored wood plastic from sawdust without binder: no. 724026; application 30.03.1961; publ. 01.01.1961. A. V. Chuiko, E. S. Chuiko. EDN OTVXCL. (In Russ.)
23. Copyright certificate no. 142017 A1 USSR, IPC B27N 3/02. A method for making colored tiles from sawdust without the introduction of a binder: no. 724028; application 30.03.1961; publ. 01.01.1961. A. V. Chuiko, E. S. Chuiko. EDN SXIKIS. (In Russ.)
24. Copyright certificate no. 142018 A1 USSR, IPC B27N 3/02. Method of making colored tiles from sawdust without binder: no. 724029; application 30.03.1961; publ. 01.01.1961. A. V. Chuiko, E. S. Chuiko. EDN GKUYFP. (In Russ.)
25. Zhulanova A. E., Glushankova I. S. Utilization of lignosulfonates to obtain composite building materials. *Theoretical and applied ecology*, 2022, no. 1, pp. 134—139. doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-134-139. EDN CPORXT. (In Russ.)
26. Stupak D. P., Shkuro A. E., Artemov A. V. Obtaining and investigation of the properties of wood-polymer composites with hydrolyzed lignin. *Woodworking industry*, 2020, no. 1, pp. 72—80. EDN CNXUXS. (In Russ.)
27. Tychinkin I. V., Shishlov O. F., Glukhikh V. V. [et al.]. The influence of lignin on the reactivity of phenol-formaldehyde resin and the properties of thermal insulation material based on it. *Glues. Sealants. Technologies*, 2022, no. 8, pp. 8—14. doi: 10.31044/1813-7008-2022-8-8-14. EDN GHSXMQ. (In Russ.)

28. Savinovskikh A. V., Artemov A. V., Buryndin V. G. The influence of modifiers on the physico-mechanical properties of wood plastics without the addition of binders. *Bulletin of the Moscow State University of Forests — Lesnoy vestnik*, 2016, vol. 20, no. 3, pp. 55—59. EDN WKNMON. (In Russ.)
29. Artemov A. V., Buryndin V. G., Ershova A. S., Ladygina A. N. Hydrophobization of plastics without binders by hydrolysis lignin. *Woodworking industry*, 2023, no. 1, pp. 116—124. EDN SABZOC. (In Russ.)
30. Garth M. S., Ershova A. S., Artemov A. V. [et al.]. Investigation of the relationship between the physico-mechanical properties of wood plates. *Woodworking: technologies, equipment, management of the XXI century: Proceedings of the XVII International Eurasian Symposium, Yekaterinburg, September 13—16, 2022*. Yekaterinburg, Ural State Forestry University, 2022, pp. 140—146 (In Russ.)
31. Khrulev V. M., Martynov K. Ya. *Durability of particle boards*. Moscow, 1977. 168 p. (In Russ.)
32. Vydrina T. S., Artemov A. V., Dedyukhin V. G., Buryndin V. G. Thermal aging of products based on wood composite materials. *Chemistry of plant raw materials*, 2007, no. 2, pp. 101—106. EDN IAPFVZ. (In Russ.)

© Артёмов А. В., Буриндин В. Г., Ершова А. С., Захаров П. С., 2023

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7383

УДК 69.059

Статья

Экспериментальная оценка состояния дорог Карелии, подверженных активному воздействию лесовозного транспорта

Степанов Артём Валерьевич

кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), stepanov@petrstu.ru

Груздов Александр Владимирович

начальник отдела контроля качества работ КУРК «Управление автомобильных дорог Республики Карелия» (Российская Федерация), gruzdov@upravtodor-rk.ru

Получена: 11 сентября 2023 / Принята: 30 ноября 2023 / Опубликовано: 22 декабря 2023

Аннотация: Практически во всех лесных регионах транспортная сеть автомобильных дорог общего пользования является неотъемлемой частью логистических цепочек лесозаготовок, и её состояние в значительной степени влияет на эффективность лесной отрасли целом. Подавляющая часть древесины в Республике Карелия перевозится автомобильным транспортом — лесовозами. При этом порядка 85 % по протяжённости транспортировки осуществляется по дорогам общего пользования. Лесовоз, относящийся к тяжеловозным транспортным средствам, оказывает существенное влияние на состояние дороги. Особенно сильно это воздействие проявляется в весенний и осенний период, когда грунты земляного полотна переувлажнены и потеряли часть своей несущей способности. В данный период дорожное покрытие подвержено наибольшему повреждению, характер которого требует изучения с целью планирования и организации своевременного ремонта. В статье рассмотрены результаты диагностики состояния сети автомобильных дорог Республики Карелия с наиболее интенсивным движением лесовозного транспорта на наличие дефектов и их размеров. Проведён анализ количественной оценки различных разрушений. Разобраны причины появления основных деформаций. Определена протяжённость дорог, находящихся в нормативном и ненормативном состоянии.

Ключевые слова: сеть автомобильных дорог; лесовозные дороги; дефекты

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7383

Article

Experimental assessment of the condition of Karelia roads exposed to the active logging transport traffic

Artem Stepanov

Ph. D. in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation), stepanov@petrus.ru

Aleksandr Gruzlov

Head of the Quality Control Department, Department of Highways of the Republic of Karelia (Russian Federation), gruzlov@upravtodor-rk.ru

Received: 11 September 2023 / Accepted: 30 November 2023 / Published: 22 December 2023

Abstract: The vast majority of wood in the Republic of Karelia is transported by logging trucks and about 85% of the transportation is performed on public roads. Being a heavy vehicle, a logging truck has a significant impact on the road condition. This impact is especially strong during the spring and autumn periods, when the roadbed soil is waterlogged and has lost part of its bearing capacity. During these periods the road surface is subjected to the greatest damage; its pattern requires studying to plan and organize timely repairs. The transportation network of public roads is an integral part of the logistics chains of the regional forest industry and its condition also significantly affects the efficiency of logging in general. The article considers the results of diagnostics of the highway network state in the Republic of Karelia for the presence and dimensions of defects. The authors analyzed the results of quantitative assessment of various destructions and the causes of their occurrence. Also they determined the length of roads in normative and non-normative condition.

Keywords: highway network; logging roads; defects

1. Введение

Основной объём грузоперевозок в лесной отрасли Республики Карелия приходится на автомобильный транспорт. При этом в процессе движения лесовозных автомобилей активно задействованы автомобильные дороги общего назначения. Центральную роль в этой дорожной сети играет трасса Р-21 «Кола», соединяющая север и юг республики [5]. Очевидно, что состояние автомобильных дорог существенно влияет на всю лесную отрасль. В этой связи актуальным является своевременное выявление дефектов дорожного полотна, планирование и организация ремонтных работ, оценка экономических затрат. С целью оценки текущего состояния основных автомобильных дорог общего назначения с преобладающим движением лесовозного транспорта авторами совместно с Управлением автомобильных дорог Республики Карелия были проведены экспериментальные исследования на дорогах, примыкающих по лесным грузопотокам к основной трассе Р-21 «Кола».

2. Материалы и методы

2.1. Объекты исследования

В качестве объектов исследований были выбраны автомобильные дороги с наиболее интенсивным движением лесовозного транспорта: автодорога по д. Пялозеро, автодорога по м. Райвио, Видлица — Кинелахта — Ведлозеро, Кола — Кончезеро — ст. Шуйская — Гирвас, Кола км 423 — Петрозаводск, Кола км 435 — Петрозаводск, Кола км 435 — ст. Шуйская, Костомукша — Окамыш, Крошнозеро — Эссойла, Олонец — Верховье, подъезд к д. Евхоя через д. Красная Речка, подъезд к водопаду Кивач, подъезд к д. Койкары, подъезд к д. Мишенсельга, подъезд к д. Мунозеро, подъезд к д. Юостозеро, подъезд к м. Дорожников, подъезд к д. Ёршнаволоок, подъезд к м. Химлесхоз, подъезд к м. Лучевое-2, подъезд к м. Лучевое-1, подъезд к п. Соскуа, подъезд к п. Вяртсиля, подъезд к п. Ихоярвенкюля, подъезд к п. Куокканиеми, подъезд к п. Мелиоративный, подъезд к п. Новая Вилга, подъезд к п. Шуя, подъезд к пункту пропуска Сювяоро, подъезд к Радиоцентру, подъезд к с. Крошнозеро, подъезд к ст. Орзег, подъезд к м. Уссуне, Тивдия — Белая Гора, Хийтола — Алхо, Чална — Порожки, Шокша — Кварцитный, ст. Шуйская — Гирвас, Юостров — Райгуба, автодорога по Ужесельге, Алхо — Кетроваара, Вялимяки — Костамоярви, Деревянное — Деревянка — Пяжиева Сельга — Пухта, Ихала — Лумиваара, Кола — Антипинская, Кола — Калевала — Лонка, Крошнозеро — Гонганалица, Ласанен — Куркиёки — Терву, Лахденкюля — Пуккари, Лахденпохья — Пайкъярвенкюля, Лумиваара — Харвиа, Нукутгалаhti — Ламберг, Оппола — Нива, Пелтола — Вяттикая, подъезд к д. Верхняя Ламба через Утуки, подъезд к д. Намоево, подъезд к д. Нижняя Салма, подъезд к п. Коконниеме, подъезд к п. Отсанлахти, подъезд к п. Оявойс, подъезд к п. Рантуэ, подъезд к м. Парконмяки, подъезд к м. Рюттю, подъезд

к ст. Хуухканмяки, подъезд к туристическому объекту Горный парк «Рускеала», Пряжа — Киндасово, Пуйккола — Партала, Совхоз «Большевик» — Чайка, Терву — Вятккя, Хелюля — Заозёрный, Элисенваара — Таустамьяки, Кондопога — Горка, Педасельга — Ладва-Ветка, Петрозаводск — Суоярви, Петрозаводск — Суоярви — п. Шуя, подъезд к м. Яккима, подъезд к объекту «Горнолыжный центра Чална», подъезд к п. Маткаселькя, подъезд к п. Микли, подъезд к п. Первомайский, подъезд к совхозу им. Зайцева, Салми — Мантсинсаари, Салми — ст. Салми, Сортавала — Заозёрный — Туокслаhti, Суоярви — Койриноя, Чална — Верховье — п. Шуя.

Общая протяжённость представленных дорог составляет 1186,984 км.

При оценке состояния обращали внимание на следующие ключевые моменты:

- Наличие характерных дефектов на однородных участках (выбоины, разрушения, трещины и др.).

- Параметры продольной ровности по полосам наката дорожного покрытия.

- Параметры поперечной ровности (колеяности) по полосам наката.

Все работы выполнены на основании следующих нормативных материалов:

- ГОСТ 33101-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Покрытия дорожные.

Методы измерения ровности»;

- ГОСТ 32825-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Дорожные покрытия.

Методы измерения геометрических размеров повреждений»;

- ГОСТ Р 50597-2017 «Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Методы контроля»;

- ГОСТ Р 56925-2016 «Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерения неровностей оснований и покрытий»;

- ОДМ 218.4.039-2018 «Рекомендации по диагностике и оценке технического состояния автомобильных дорог».

2.2. Методика проведения измерений

Все измерения проводились с использованием мобильного аэродромно-дорожного измерительного комплекса — лаборатории КП-514 (фото 1).

В ходе проведения исследований проводилась фото- и видеофиксация выявленных дефектов с отметкой о месте их расположения.

Продольная ровность дорожного покрытия оценивалась по европейской методике (International Roughness Index — международный индекс ровности, IRI) по двум полосам наката профилометром, состоящим из четырёх акселерометрических датчиков (фото 2), которые были закреплены к элементам кузова и подвески автомашины.



Фото 1. Комплекс измерительный аэродромно-дорожный (лаборатория КП-514)

Photo 1. Measuring airfield and road complex (KP-514 laboratory)



Фото 2. Акселерометрический датчик

Photo 2. Accelerometric sensor

Профилометр обеспечивал измерение продольной ровности покрытия дороги при скорости движения лаборатории до 80 км/ч с шагом измерений 125 мм. При измерении определялось суммарное перемещение неподдрессоренной части кузова относительно поддрессоренной. Показатель ровности (IRI) измерялся на всём протяжении участка. По результатам измерения IRI строится график (рисунок 1), где места значимых колебаний характеризуют места наличия неровностей на проезжей части автомобильной дороги.

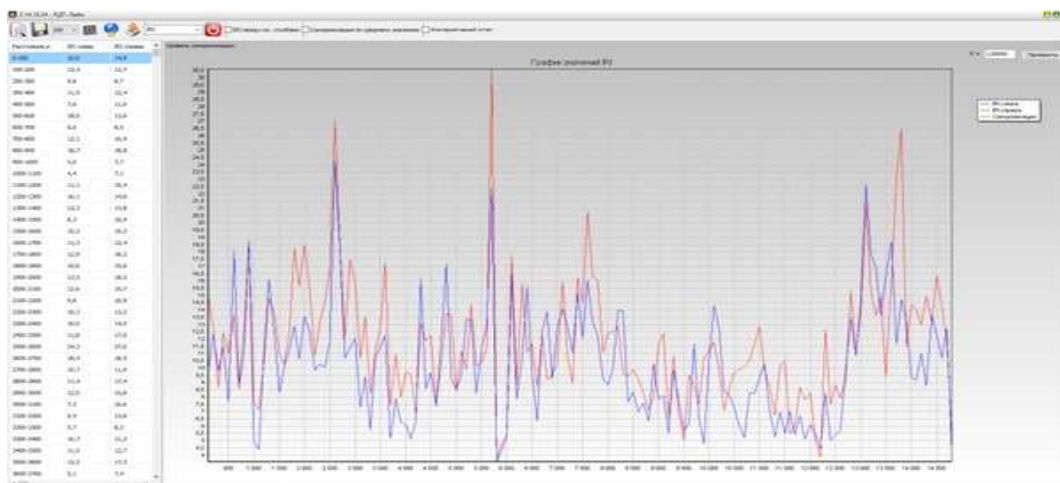


Рисунок 1. График значений показателя ровности (IRI)

Figure 1. Graph of IRI values

Определение поперечной ровности оценивалось по данным лазерно-оптического сканера (ЛОС) — эта система предназначена для измерения высотных отметок точек поперечного профиля на полосе шириной до 3,75 м. Информация, полученная из ЛОС, позволяет определять наличие и глубину колеи на обследуемом участке автомобильных дорог, а также, будучи обработанной совместно с данными системы измерения геометрических параметров, получать цифровую модель покрытия, которая, в свою очередь, может быть использована для решения проектных задач и экспорта в САПР.

Принцип действия состоит в определении поперечного профиля следа лазерного излучателя на покрытии автомобильной дороги. По данным лазерно-оптического сканирования может быть построен поперечный профиль с отображёнными значениями поперечной ровности (рисунок 2).

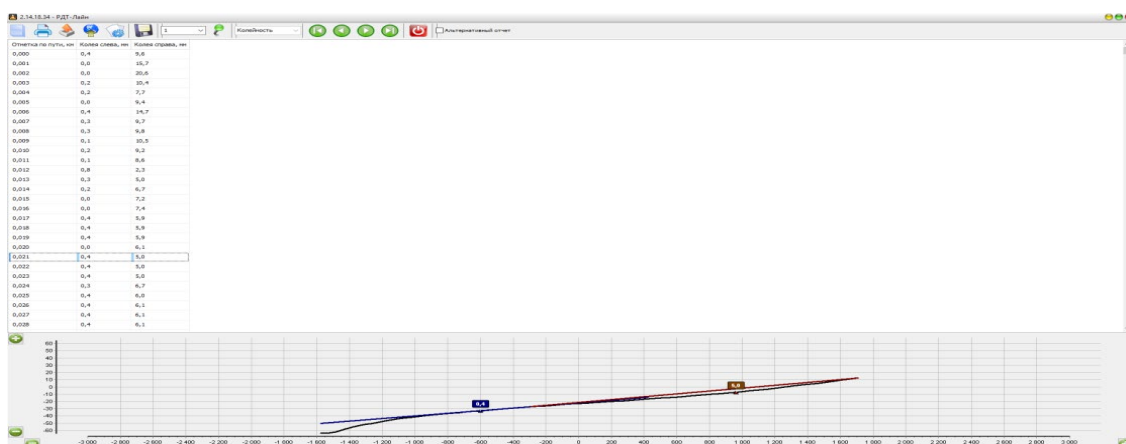


Рисунок 2. Поперечный профиль колеиности

Figure 2. Transverse track profile

Повреждения поверхности проезжей части (выбоины, колеи, продольные волны, разрушенный слой покрытия, неровности от некачественного ремонта, в т. ч. возле люков колодцев) фиксировались с помощью видеосъёмки. Видеосъёмка обследуемых участков дорог осуществлялась тремя цифровыми видеокамерами высокого разрешения, с расширенным динамическим диапазоном и общим углом захвата 180°, в прямом и обратном направлениях по полосам движения, с учётом технической категории дороги (фото 3).



Фото 3. Система видеосъёмки

Photo 3. Video recording system

Размер кадра при съёмке 1920×1600 точек с привязкой видеокадров к километражу и абсолютной системе координат. Это обеспечивало чтение текстовой информации на дорожных знаках, определение линейных и площадных размеров элементов автомобильной дороги.

Все измерения выполнялись за один проход лаборатории КП-514, таким образом, одновременно с видеосъёмкой происходит определение ровности проезжей части по всей ширине проезжей части прямого и обратного направления каждого 100-метрового участка автомобильной дороги.

Участок дороги, на котором зафиксированы повреждения, оценивался как находящийся в ненормативном состоянии.

3. Результаты

Рассмотрим полученную информацию на примере одного из участков автодороги Видлица — Кинелахта — Ведлозеро (фото 4).

Как видно из фото 4, информацию о покрытии, состоянии системы водоотвода и других параметров на конкретном километре $16 + 104$ автодороги Видлица — Кинелахта — Ведлозеро можно оценить по полученной видеосъёмке с привязкой к системе географических координат.



Фото 4. Фрагмент видеосъёмки участка дороги Видлица — Кинелахта — Ведлозеро, км. 16 + 104

Photo 4. A fragment of a video recording of a section of the Vidlitsa — Kinelakhta — Vedlozero road, km 16 + 104

Результаты оценки представлены в таблице 1.

Таблица 1. Ведомость дефектов покрытия с 16-го по 17-й км

Table 1. List of coating defects from 16 to 17 km

Наименование дороги		Видлица — Кинелахта — Ведлозеро				
Начало дороги, км + м		0 + 000				
Конец дороги, км + м		61 + 400				
Длина дороги		61,4				
Статус дороги		Общего пользования регионального или межмуниципального значения				
Адрес начала участка, км + м	Адрес конца участка, км + м	Длина участка, м	Код дефектов		Оценка в баллах	
			Прямое направление	Обратное направление	Прямое направление	Обратное направление
16 + 000	16 + 100	100	6	6	2,5	2,5
16 + 100	16 + 200	100	5	5	3,5	3,5
16 + 200	16 + 300	100	5	5	3,5	3,5
16 + 300	16 + 400	100	5	5	3,5	3,5
16 + 400	16 + 500	100	5	5	3,5	3,5
16 + 500	16 + 600	100	5	5	3,5	3,5
16 + 600	16 + 700	100	5	5	3,5	3,5
16 + 700	16 + 800	100	5	5	3,5	3,5
16 + 800	16 + 900	100	5	5	3,5	3,5
16 + 900	17 + 000	100	5	5	3,5	3,5

Участки автомобильной дороги, на которых зафиксированы повреждения с балльной оценкой менее 4, находятся в ненормативном состоянии.

Как было сказано выше, помимо фиксации дефектов происходит определение ровности покрытия (таблица 2). Показания индекса IRI представляются в следующем виде.

Таблица 2. Ведомость показателей продольной ровности покрытия с 16-го по 17-й км

Table 2. A list of indicators of the longitudinal coating evenness from 16 to 17 km

Наименование дороги		Видлица — Кинелахта — Ведлозеро										
Начало дороги, км + м		0 + 000										
Конец дороги, км + м		61 + 400										
Длина дороги		61,4										
Статус дороги		Общего пользования регионального или межмуниципального значения										
Адрес начала участка, км + м	Адрес конца участка, км + м	Показатель ровности покрытия на полосах (IRI)								Наихудший показатель ровности	Норматив	Протяжённость, м
		1	2	3	4	5	6	7	8			
16 + 000	16 + 100	20,06								20,06	8,0	100
16 + 100	16 + 200	9,91								9,91	8,0	100
16 + 200	16 + 300	10,65								10,65	8,0	100
16 + 300	16 + 400	14,05								14,05	8,0	100
16 + 400	16 + 500	10,1								10,1	8,0	100
16 + 500	16 + 600	13								13	8,0	100
16 + 600	16 + 700	15,52								15,52	8,0	100
16 + 700	16 + 800	10,46								10,46	8,0	100
16 + 800	16 + 900	8,61								8,61	8,0	100
16 + 900	17 + 000	8,03								8,03	8,0	100

Из представленных данных видно, что по показателю IRI участок дороги с 16-го по 17-й км дороги Видлица — Кинелахта — Ведлозеро находится в неудовлетворительном состоянии. Однако показатель IRI больше подходит как характеристика для дорог с капитальным покрытием; на дорогах с переходным покрытием он может резко поменяться в течение суток за счёт прохода автогрейдера или, наоборот, за счёт быстрого разрушения в период сильных осадков в виде дождя в сочетании с интенсивным движением или движением грузовых автомобилей. Помимо этого, на представленном участке

(см. таблицу 1) вся дорога длиной в 1 км находится в ненормативном состоянии, из преобладающих дефектов код 5, т. е. выбоины на расстоянии 6—8 м.

После обработки аналогичных данных всех исследуемых дорог общей протяжённостью 1186,984 км была составлена сводная таблица дефектов дорожного покрытия (таблица 3).

Таблица 3. Дефекты дорожного покрытия

Table 3. Defects

Вид дефекта	Оценка, баллы	Код дефекта	Объём дефекта по частоте возникновения, %	Протяжённость исследуемых дорог с данным видом дефекта, км
1	2	3	4	5
Без дефектов и поперечные одиночные трещины на расстоянии более 40 м (для переходных покрытий отсутствие дефектов)	5,0	1	24,7	292,8
Поперечные одиночные трещины (для переходных покрытий отдельные выбоины) на расстоянии 20—40 м между трещинами	4,9	2	1,8	21,7
То же на расстоянии 10—20 м	4,6	3	0,7	7,9
Поперечные редкие трещины (для переходных покрытий выбоины) на расстоянии 8—10 м	4,3	4	11,5	136
То же 6—8 м	3,9 (3,5)*	5	15,0	177,5
То же 4—6 м	3,6 (2,5)*	6	7,9	93,8
Поперечные частые трещины на расстоянии между соседними трещинами 3—4 м	3,2	7	0,0	0
То же 2—3 м	2,9	8	0,1	0,7
То же 1—2 м	2,6	9	0,1	1,4
Продольная центральная трещина	4,5	10	2,8	33,2
Продольные боковые трещины	3,5	11	15,7	186,6
Одиночная сетка трещин на площади до 10 м с крупными ячейками (сторона ячейки более 0,5 м)	3,0	12	0,2	2,7
Одиночная сетка трещин на площади до 10 м с мелкими ячейками (сторона ячейки менее 0,5 м)	2,5	13	0,3	3,2
Густая сетка трещин на площади до 10 м	2,0	14	3,7	43,9
Сетка трещин на площади более 10 м при относительной площади, занимаемой сеткой, 30—10 %	2,3	15	0,8	9,3

Продолжение таблицы 3.

Continuation of table 3.

1	2	3	4	5
То же 60—30 %	1,9	16	2,1	25,3
То же 90—60 %	1,6	17	7,2	85,8
Просадки (пучины) при относительной площади просадок 20—10 %	1,2	18	0,1	1,1
То же 50—20 %	0,9	19	0,0	0
То же более 50 %	0,5	20	0,0	0
Проломы дорожной одежды (вскрывшиеся пучины) при относительной площади, занимаемой проломами, 10—5 %	1,2	21	0,1	0,6
То же 30—10 %	0,9	22	0,0	0
То же более 30 %	0,5	23	0,0	0
Одиночные выбоины на покрытиях, содержащих органическое вяжущее (расстояние между выбоинами более 20 м)	4,5	24	0,0	0,3
Отдельные выбоины на покрытиях, содержащих органическое вяжущее (расстояние между выбоинами 10—20 м)	3,5	25	0,3	3,8
Редкие выбоины в тех же случаях (расстояние 4—10 м)	2,7	26	0,5	5,3
Частые выбоины в тех же случаях (расстояние 1—4 м)	2,2	27	1,5	16,6
Карты заделанных выбоин, залитые трещины	3,0	28	1,0	11,7
Поперечные волны, сдвиги	2,4	29	1,6	19,2
Колейность при средней глубине колеи 20—30 мм	3,0—4,0	30	0,3	3
Колейность при средней глубине колеи 30—40 мм	2,5—3,0	31	0,0	0,3
Колейность при средней глубине колеи 40—50 мм	2,0—2,5	32	0,0	0
Колейность при средней глубине колеи 50—70 мм	1,8—2,0	33	0,0	0

Согласно данным таблицы 3 (столбец 4), по частоте встречаемости разрушения расположились следующим образом (рисунок 3).



Рисунок 3. Частота встречаемости дефектов

Figure 3. Frequency of defects occurrence

4. Обсуждение и заключение

По результатам проведённых исследований установлено, что причинами возникновения поперечных трещин чаще всего является расширение и сужение асфальтобетонного покрытия ввиду перепада температур. Выбоины на переходных покрытиях образуются из-за отсутствия достаточной связности материала, и его частицы свободно перемещаются от воздействия колёс транспорта. Продольные боковые трещины появляются в результате усталостного разрушения материала покрытия либо продавливания основания дорожной одежды, земляного полотна. Данный дефект в значительной степени обусловлен движением большегрузных автомобилей. Сетка трещин появляется на пучинистых участках. Центральная трещина — это, как правило, технологическая трещина в месте стыка двух смежных полос укладки асфальтобетона. Выбоины в асфальтобетонных покрытиях могут быть дальнейшим развитием сетки трещин либо развитием выкрашивания покрытия ввиду старения битума. Поперечные сдвиги характерны для участков с частыми экстренными торможениями или ускорениями автомобилей.

В целом, можно сделать заключение, что на дорогах Республики Карелия дефекты дорожной одежды образуются, в основном, из-за усталостного разрушения покрытия либо использования в конструктиве земляного полотна и покрытия слабых или пучинистых материалов.

По результатам обработки всего массива исследований 1186,984 км дорог Республики Карелия установлено, что лишь 363,229 км находятся в нормативном состоянии, это в процентном эквиваленте равняется 30,6 %. Следовательно, 69,4 % дорог требуют проведения ремонтных работ (рисунок 4).

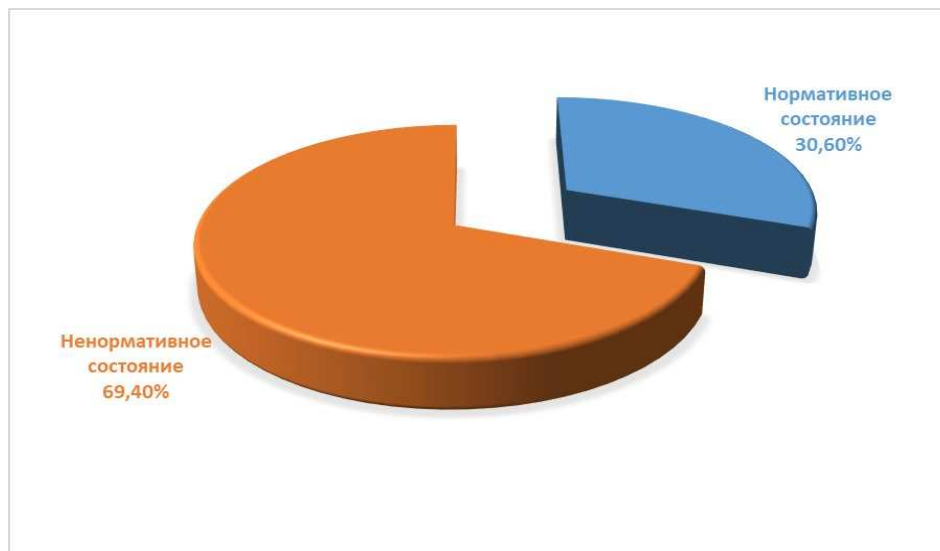


Рисунок 4. Состояние автомобильных дорог

Figure 4. The condition of the highways

Также выяснилось, что значения продольного уклона дорожной одежды тоже не соответствуют нормам на 51,03 % по протяжённости исследуемых дорог.

Исследования были проведены в рамках реализации Программы поддержки НИОКР студентов, аспирантов и лиц, имеющих учёную степень, финансируемой Правительством Республики Карелия.

Список литературы

1. ГОСТ 33101-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Покрытия дорожные. Методы измерения ровности». М., 2016. 23 с.
2. ГОСТ 32825-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Дорожные покрытия. Методы измерения геометрических размеров повреждений». М., 2015. 16 с.
3. ГОСТ Р 50597-2017 «Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Методы контроля». М., 2018. 30 с.
4. ГОСТ Р 56925-2016 «Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерения неровностей оснований и покрытий». М., 2016. 15 с.
5. ОДМ 218.4.039-2018 «Рекомендации по диагностике и оценке технического состояния автомобильных дорог». М., 2018. 64 с.

6. Степанов А. В., Винокурова Т. Г., Марков В. И. Оценка автотранспортного сообщения районов Республики Карелия // Инженерный вестник Дона. 2021. № 5.
7. FINAL REPORT on the project KA1029 «Innovations, research and education for roads and transport as an engine for growing cross-border business cooperation» (IRERT). Petrozavodsk, 2019. 86 p.
8. Zhang L. N., He D. P., Zhao Q. Q. Modeling of international roughness index in seasonal frozen area // Magazine of Civil Engineering. 2021. No. 4 (104). P. 102—104.
9. Zhao Q. Q., Zhang H. T., Fediuk R. S. Freeze-thaw damage model for cement pavements in seasonal frost regions // Magazine of Civil Engineering. 2021. No. 4 (104). P. 104—106.
10. Schürmann C., Spiekermann K., Wegener M. Accessibility Indicators, Bericht aus dem Institut für Raumplanung 39. Dortmund, IRPUD, 1997. 32 p.
11. Törnqvist G. Contact Systems and regional development. Lund Study in Geography B 35, Lund, CWK Gleerup, 1970. 108 p.

References

1. GOST 33101-2014 «Public roads. Road surfaces. Methods of measuring evenness». Moscow, 2016. 23 p. (In Russ.)
2. GOST 32825-2014 «Public roads. Road surfaces. Methods of measuring the geometric dimensions of damage». Moscow, 2015. 16 p. (In Russ.)
3. GOST R 50597-2017 «Automobile roads and streets. Requirements for the operational condition acceptable under the conditions of road safety. Control methods». Moscow, 2018. 30 p. (In Russ.)
4. GOST R 56925-2016 «Automobile roads and airfields. Methods for measuring irregularities of bases and coatings». Moscow, 2016. 15 p. (In Russ.)
5. ODM 218.4.039-2018 «Recommendations for the diagnosis and assessment of the technical condition of highways». Moscow, 2018. 64 p. (In Russ.)
6. Stepanov A. V., Vinokurova T. G., Markov V. I. Assessment of road transport in the regions of the Republic of Karelia. *Engineering Bulletin of the Don*, 2021, no. 5. (In Russ.)
7. FINAL REPORT on the project KA1029 «Innovations, research and education for roads and transport as an engine for growing cross-border business cooperation» (IRERT). Petrozavodsk, 2019. 86 p.
8. Zhang L. N., He D. P., Zhao Q. Q. Modeling of international roughness index in seasonal frozen area. *Magazine of Civil Engineering*, 2021, no. 4 (104), pp. 102—104.
9. Zhao Q. Q., Zhang H. T., Fediuk R. S. Freeze-thaw damage model for cement pavements in seasonal frost regions. *Magazine of Civil Engineering*, 2021, no. 4 (104), pp. 104—106.
10. Schürmann C., Spiekermann K., Wegener M. *Accessibility Indicators, Bericht aus dem Institut für Raumplanung* 39. Dortmund, IRPUD, 1997. 32 p.
11. Törnqvist G. *Contact Systems and regional development*. Lund Study in Geography B 35, Lund, CWK Gleerup, 1970. 108 p.