

№20 (1)

ISSN 2307-0048

Resources and Technology

научный журнал

2023

Resources and Technology

№20 (1)

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@petrsu.ru. Номер телефона: 8 (8142) 76-97-11.

Resources and Technology

№20 (1)

Mass media registration certificate #ФС77-57768 (18/04/2014).

Founder: Petrozavodsk State University.

E-mail: rt@petrsu.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, sionnev@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. Syunnev, Vladimir (Russia), siounnev@psu.karelia.ru.

Содержание №1, Т. 20, 2023

<i>Васильев В. В., Афоничев Д. Н.</i>	Расчет прочности модернизированной плоской сплошной единицы	1 - 25
<i>Каляшов В. А., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Новиков М. С., Григорьева О. И.</i>	Классификация склонов оттаивающих почвогрунтов по геотехническим условиям их взаимодействия с движителями лесных машин	26 - 41
<i>Карасев Ю. А., Марков В. А., Дмитриев А. С., Должиков И. С., Юдилевич А. М.</i>	Перспективность дальнейших исследований по совершенствованию гусеничных лесных машин	42 - 86
<i>Васильев С. Б., Девятникова Л. А., Колесников Г. Н.</i>	Влияние длины измельчаемого отрезка бревна на фракционный состав щепы	87 - 111
<i>Графова Е. О., Степанов А. В., Сюнёв В. С., Катаров В. К.</i>	Повышение экологической безопасности трассы Р-21 «Кола» как центрального элемента лесной инфраструктуры Карелии	112 - 128

Content №1, Vol. 20, 2023

<i>Vasiliev V. V., Afonichev D. N.</i>	Calculation of the upgraded flat unit strength	1 - 25
<i>Kalyashov V., Shapiro V.,</i>	Classification of slopes with thawing soils according to the	
<i>Grigorev I., Kunickaya O.,</i>	geotechnical conditions of their interaction with the forest	26 - 41
<i>Novikov M., Grigoreva O.</i>	machine movers	
<i>Karasev Y., Markov V., Dmitriev A., Dolzhikov I., Yudilevich A.</i>	Prospects for further research on the improvement of tracked forest vehicles	42 - 86
<i>Vasilyev S., Devyatnikova L., Kolesnikov G.</i>	The effect of the chipping log sections length on the fractional composition of wooden chips	87 - 111
<i>Grafova E., Stepanov A., Syunnev V., Katarov V.</i>	Increasing the environmental safety of the R-21 "Kola" road as a central element of the Karelian forest infrastructure	112 - 128

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6623

УДК 630*378.33

Статья

Расчёт прочности модернизированной плоской сплоточной единицы

Васильев Владимир Викторович

кандидат технических наук, Филиал АО «УК ЭФКО» в г. Алексеевке

(Российская Федерация), vasiliev.vladimir87@mail.ru

Афоничев Дмитрий Николаевич

доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», г. Воронеж (Российская Федерация), dmafonichev@yandex.ru

Получена: 19 ноября 2022 / Принята: 13 января 2023 / Опубликована: 22 января 2023

Аннотация: Возобновление сплава лесоматериалов на малых и средних реках требует совершенствования плоских сплоточных единиц, характеризующихся высокими транспортно-эксплуатационными показателями. Представлена модернизированная плоская сплоточная единица, имеющая высокие транспортно-эксплуатационные показатели и упрощённую конструкцию, которая обеспечивает возможность изготовления данной сплоточной единицы в сплоточной машине. Указанные преимущества плоской сплоточной единицы достигнуты тем, что ряды круглых лесоматериалов укладываются между нижними и верхними поперечными прокладками, где верхние поперечные прокладки, предварительно прижатые по всей длине к круглым лесоматериалам в сплоточной машине, соединены с нижними поперечными прокладками с помощью сплоточного такелажа. Практическая эксплуатация рассмотренной плоской сплоточной единицы на первоначальном сплаве лесоматериалов требует определение её ключевых транспортно-эксплуатационных показателей с акцентом на расчёт прочности сплоточной единицы. Предложена методика расчёта прочности плоской сплоточной единицы, заключающаяся в обосновании геометрических параметров нижних и верхних поперечных прокладок, колец с ребристой внутренней поверхностью, цепей и талрепы. Обоснование геометрических параметров нижних и верхних поперечных прокладок основывалось на учёте всех видов напряжений, возникающих в поперечных прокладках при действии на них

различных внешних и внутренних сил, предельно допускаемого напряжения древесины прокладок и комплекса коэффициентов запаса прочности. При обосновании параметров сплоточного такелажа учитывались деформации, возникающие в кольцах с ребристой внутренней поверхностью, цепях и талрепе при действии на них максимальной силы, предельно допускаемое напряжение материала, из которого изготавливается сплоточный такелаж, и коэффициент запаса прочности. Получены зависимости для расчёта диаметра в верхнем отрезе нижних и верхних поперечных прокладок. Также получены зависимости для расчёта толщины колец с ребристой внутренней поверхностью и диаметра сварной цепи, определено условие выбора талрепы. Реализация сплава древесины на базе модернизированной плоской сплоточной единицы с обязательным расчётом геометрических параметров нижних и верхних поперечных прокладок и сплоточного такелажа по представленной методике даст возможность выполнять безаварийный сплав лесоматериалов с высокой экономической эффективностью.

Ключевые слова: сплоточная единица, такелаж сплоточный, прочность

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6623

Article

Calculation of the upgraded flat unit strength

Vladimir Vasiliev

*Ph. D. in engineering, Branch of JSC «UK EFKO» in Alekseevka (Russian Federation),
vasiliev.vladimir87@mail.ru.*

Dmitry Afonichev

*D. Sc. in engineering, professor, Federal State Budget Education Institution
of Higher Education «Voronezh State Agrarian University named after
Emperor Peter the Great», Voronezh (Russian Federation), dmafonichev@yandex.ru*

Received: 19 November 2022 / Accepted: 13 January 2023 / Published: 22 January 2023

Abstract: Timber floating on small and medium-sized rivers requires the improvement of flat-flow units characterized by high transport and performance indices. The authors present a modernized flat-flow unit which has high transport and performance indices. A simplified design of the unit allows its manufacturing in a flat-flow machine. This is achieved when rows of round timber are stacked between the lower and upper transverse stickers, where the upper transverse stickers previously pressed along the entire length to the round timber in the flat machine are connected to the lower transverse stickers with raft cables. The practical operation of the considered flat raft unit for the initial timber floating requires its key transport and performance indices calculation with the focus on the calculation of the raft unit strength. The calculation method substantiates the geometric parameters of the lower and upper transverse stickers, rings with a ribbed inner surface, chains and lanyards. The justification of the geometric parameters of the lower and upper transverse stickers was based on taking into account all types of stresses arising in the transverse stickers subjected to various external and internal forces, the maximum allowable stress of the wood of the stickers and a set of safety factors. To justify the parameters of the raft cables the authors took into account deformations occurring in rings with a ribbed inner surface, chains and lanyards subjected to maximum force, the maximum allowable stress of the raft cables material and the safety factor. Dependency for calculating the diameter in the upper section of the lower and upper transverse stickers is obtained. Dependencies for calculating the thickness of rings with a ribbed inner surface and the diameter of the welded chain are also obtained, the condition for choosing lanyards is determined. Timber floating based on a modernized flat raft unit implementation with the mandatory

calculation of the geometric parameters of the lower and upper transverse stickers and raft cables according to the presented methodology will allow a trouble-free timber floating with high economic efficiency.

Keywords: flat raft unit, transverse stickers, raft cables, strength

1. Введение

Использование существующих водных объектов для сплава древесины в настоящее время осуществляется не равномерно: основная нагрузка ложится на большие и крупные реки, а также озёра и водохранилища. При этом малые и средние реки, к которым примыкают большие запасы высококачественной спелой древесины, в меньшей степени эксплуатируются. Основной причиной низкой степени эксплуатации малых и средних рек является отмена молевого сплава древесины [1—5], который широко применялся на данных водных объектах.

Отмена молевого сплава древесины на водных объектах Российской Федерации послужила развитию новых способов транспортировки лесоматериалов на реках с лимитирующими габаритами сплавного хода. Первый способ включает использование на малых и средних реках микропучков [4], [6—7], объём которых составляет не более $5,0 \text{ м}^3$, из которых на больших и крупных реках формируют двухъярусные пакеты для дальнейшей их транспортировки в составе плота. Второй способ заключается в применении на малых и средних реках плоских сплоточных единиц [2—4], [8—11], обладающих малой осадкой и высокой эффективностью использования габаритов сплавного хода. Из плоских сплоточных единиц могут формироваться линейки для буксировки по водным объектам с лимитирующими габаритами сплавного хода, на больших и крупных реках из плоских сплоточных единиц и линеек на их основе создаются магистральные плоты. Наиболее перспективным на сегодняшний день является способ сплава лесоматериалов в плоских сплоточных единицах [4], требующий наличия совершенных конструкций данных сплоточных единиц, которые будут способствовать экономически выгодной реализации транспортно-технологических схем поставки древесины потребителям [12—14].

Известные плоские сплоточные единицы имеют различные конструктивные особенности и применяемые виды сплоточного такелажа, при этом они обладают недостатками, главными из которых являются сложность конструкции, высокая трудоёмкость изготовления, низкая прочность при большом расходе сплоточного такелажа, отсутствие возможности изготовления в сплоточных машинах [15—26]. Указанные недостатки плоских сплоточных единиц не позволяют полноценно реализовать транспортно-технологические схемы [12—14], а следовательно, довести сплав лесоматериалов по малым и средним рекам до номинальных объёмов. На основании вышесказанного определена цель работы: модернизировать конструкцию плоской сплоточной единицы, обладающей высокой прочностью и возможностью машинной сборки, а также разработать методику расчёта прочности данной сплоточной единицы.

2. Материалы и методы

Используя базовый прототип плоской сплоточной единицы, выполненной по типу костромской кошмы, была получена модернизированная плоская сплоточная единица, которая представлена на рисунке 1. Данная плоская сплоточная единица [27] содержит ряды круглых лесоматериалов 1, уложенных на нижние поперечные прокладки 2. Сверху рядов круглых лесоматериалов 1 наложены верхние поперечные прокладки 3. Концы нижних 2 и верхних 3 поперечных прокладок, предварительно прижатых по всей длине к круглым лесоматериалам 1 в сплоточной машине, стянуты сплоточным такелажем 4. Сплоточный такелаж 4 включает два кольца 5 с ребристой внутренней поверхностью для крепления к поперечным прокладкам 2 и 3. Кольца 5 соединены между собой с помощью цепей 6 через талрепу 7, снабжённую контргайками 8.

Рассмотренная конструкция плоской сплоточной единицы имеет ряд преимуществ над своим прототипом, где одним из предпочтений является возможность изготовления данной сплоточной единицы в сплоточной машине с минимальными затратами ручного труда [28]. При этом точечное внедрение данной плоской сплоточной единицы на сплав лесоматериалов по малым и средним рекам требует обязательного обоснования основных транспортно-эксплуатационных показателей. В данном случае акцент ставится на обосновании методики расчёта прочности плоской сплоточной единицы, т. к. правильный подбор верхних и нижних прокладок, а также сплоточного такелажа является залогом безаварийной реализации первоначального и магистрального сплава лесоматериалов.

Обоснование методики расчёта прочности модернизированной плоской сплоточной единицы основывается на методах теоретического исследования.

3. Результаты

Прочность плоской сплоточной единицы — способность сплоточного такелажа противостоять разрушению от воздействия внутренних сил (сил распора) и внешних сил, где для данной плоской сплоточной единицы её прочность обуславливается прочностью нижних и верхних прокладок, колец с ребристой внутренней поверхностью, сварных цепей и талрепы. Расчёт прочности нижних и верхних прокладок сводится к определению их оптимального диаметра в верхнем отрезе, при котором прокладки будут обеспечивать заданную форму плоской сплоточной единицы, а расчёт на прочность осуществляется при плоском изгибе.

Во время изготовления сплоточной единицы на прокладки действует сила прижатия к рядам круглых лесоматериалов, при транспортировке — сила, возникающая от веса сплоточной единицы, если она поднимается за верхние прокладки. При сплаве действуют сила распора, которая возникает из-за увеличения объёма древесины при её водонасыщении, и внешние силы от волн и т. д., при выгрузке сплоточных единиц также действует сила, возникающая от веса сплоточной единицы. Если рассматривать общий принцип воздействия

возможных сил на верхние прокладки, то можно сделать вывод, что все силы не действуют одновременно, а наиболее опасной при условии осуществления сплава в нормальных условиях является сила, возникающая от веса сплоточной единицы, если она поднимается за верхние прокладки или за крайние круглые лесоматериалы верхнего ряда.

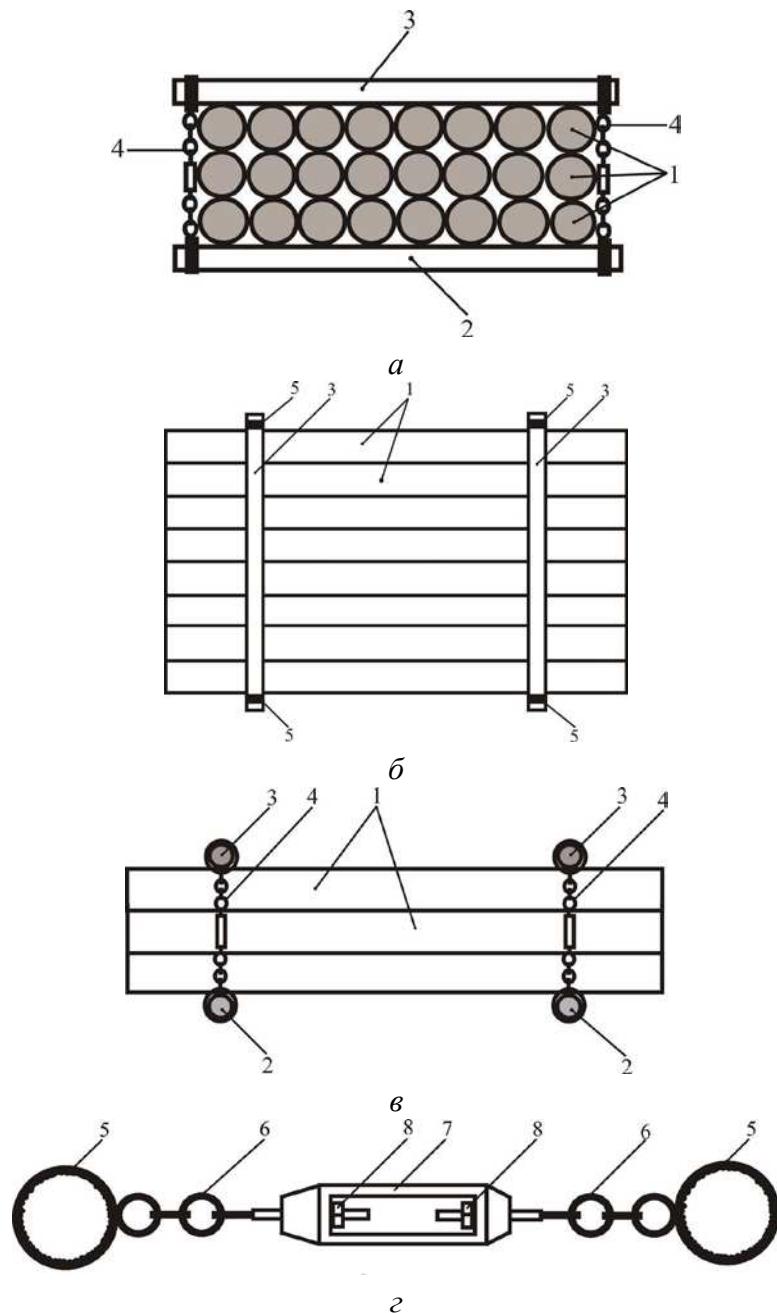


Рисунок 1. Модернизированная плоская сплоточная единица: **a** — вид спереди; **б** — вид сверху; **в** — вид сбоку; **г** — сплоточный такелаж

Figure 1. Upgraded flat splice unit: **(a)** front view; **(b)** top view; **(c)** side view; **(d)** raft cables

При поднятии плоской сплотовочной единицы за верхние прокладки, например чокерными захватами, они могут располагаться перед кольцами с ребристой внутренней поверхностью сплотовочного такелажа (рисунок 2 a), т. е. быть отнесёнными к торцевой части прокладки, тогда реакции опор R_A и R_B будут возникать в точках A и B , в местах обхвата каждой верхней прокладки ребристыми кольцами, а силы сосредоточения P_{PCE} будут находиться в местах контакта чокерных захватов.

Если поднятие плоской сплотовочной единицы осуществляется за верхние прокладки чокерными захватами, которые располагаются после колец с ребристой внутренней поверхностью (рисунок 2 b), т. е. между ними и точками касания верхних прокладок с крайними круглыми лесоматериалами верхнего ряда, то реакции опор R_A и R_B будут возникать в точках A и B , в местах контакта чокерных захватов с верхними прокладками, а силы сосредоточения P_{PCE} будут находиться в местах обхвата кольцами верхних прокладок. В случае, когда поднятие плоской сплотовочной единицы выполняется чокерными захватами за крайние круглые лесоматериалы верхнего ряда (рисунок 2 c), реакции опор R_A и R_B будут возникать в точках A и B , в местах контакта верхних прокладок с крайними круглыми лесоматериалами верхнего ряда, а силы сосредоточения P_{PCE} будут находиться в местах обхвата кольцами с ребристою внутренней поверхностью верхних прокладок. Таким образом, на каждую верхнюю прокладку будет действовать основная сила сосредоточения, возникающая от веса плоской сплотовочной единицы, которая передаётся на них через нижние прокладки и сплотовочный такелаж при условии плотного контакта верхних прокладок с крайними круглыми лесоматериалами верхнего ряда, т. е. участок верхних прокладок, который располагается между точками касания каждой прокладки с боковыми круглыми лесоматериалами верхнего ряда, не будет испытывать изгибающий момент или изгибающий момент будет минимальный.

Из рисунка 2, который представляет собой схемы нагрузки верхней прокладки, видно, что верхняя прокладка плотно прилегает к крайним круглым лесоматериалам, а реакции опор R_A и R_B возникают в точках A и B , которые направлены в противоположную сторону сосредоточенных сил P_{PCE} , где $R_A = R_B = P_{PCE}$. При этом в верхней прокладке при изгибе будут возникать нормальное напряжение σ_{BII} и касательное напряжение τ_{BII} , которое также учитывается при расчёте оптимального (минимально допустимого) диаметра в верхнем отрезе верхней прокладки.

На основании вышесказанного и закона Гука при изгибе нормальное напряжение σ_{BII} , возникающее в поперечном сечении верхней прокладки, будет следующим [29—40]:

$$\sigma_{BII} = \frac{M_{BII}y}{J_{BII}} = \frac{M_{BII}}{W_{BII}}, \quad (1)$$

где M_{BII} — изгибающий момент в поперечном сечении верхней прокладки, Н·м; y — расстояние от нейтральной оси до крайней точки, м; J_{BII} — момент инерции

поперечного сечения верхней прокладки относительно нейтральной оси, м⁴; W_{BII} — осевой момент сопротивления сечения верхней прокладки, м³.

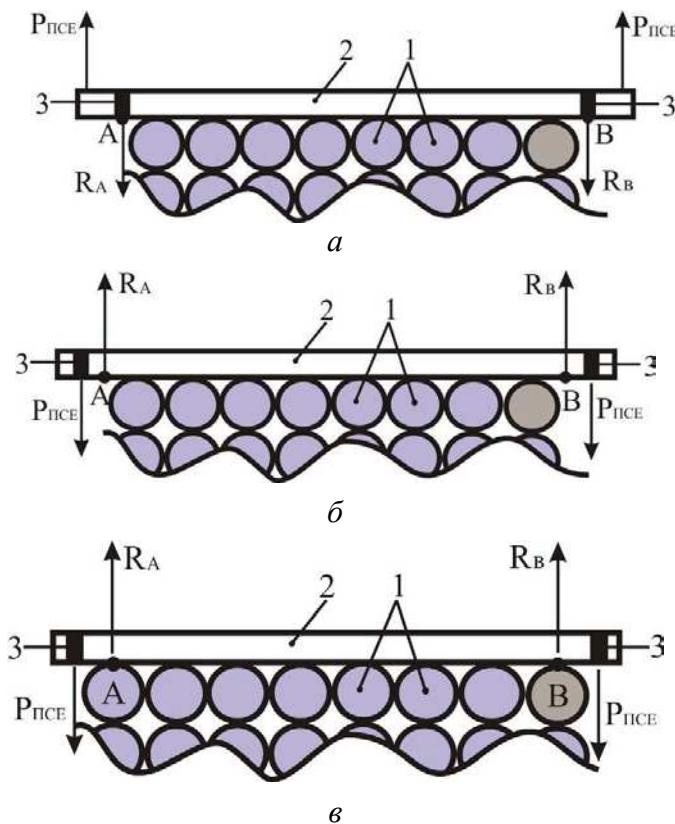


Рисунок 2. Схемы распределения нагрузок на верхнюю прокладку:
 а — расположение чокерных захватов перед кольцами; б — расположение чокерных захватов после колец; в — расположение чокерных захватов на концах крайних круглых лесоматериалов верхнего ряда; 1 — верхний ряд круглых лесоматериалов; 2 — верхняя прокладка; 3 — кольцо с ребристой внутренней поверхностью

Figure 2. Load distribution schemes for the upper sticker: (a) the location of choker grips in front of the rings; (b) the location of choker grips behind the rings; (c) the location of choker grips at the ends of the extreme round timber of the upper row; 1 – the upper row of round timber; 2 – the upper sticker; 3 – a ring with a ribbed inner surface

Используя равенство (1), запишем условие прочности верхней прокладки:

$$\sigma_{\max BII} = \frac{M_{\max BII}}{W_{BII}} \leq [\sigma_u], \quad (2)$$

где $\sigma_{\max BII}$ — максимальное напряжение, возникающее в верхней прокладке от действия внешних сил, Па; $M_{\max BII}$ — максимальный изгибающий момент в поперечном сечении верхней прокладки, Н·м; $[\sigma_u]$ — допускаемое напряжение при изгибе, Па.

Допускаемое напряжение при изгибе $[\sigma_H]$ можно рассчитать по формуле

$$[\sigma_H] = \frac{\sigma_{H_{\text{пред}}}}{[k_{3ПП}] k_{BD}}, \quad (3)$$

где $\sigma_{H_{\text{пред}}}$ — предельно допускаемое напряжение при изгибе, Н/м²; $[k_{3ПП}]$ — коэффициент запаса прочности при изгибе для прокладок, учитывающий дополнительные внешние нагрузки, действующие на плоскую сплошную единицу; k_{BD} — коэффициент учёта влажности древесины прокладки.

В формуле (3) коэффициент запаса прочности при изгибе $[k_{3ПП}]$ для прокладок, учитывающий дополнительные внешние нагрузки, действующие на плоскую сплошную единицу, предусматривает обеспечение дополнительного запаса прочности. Например, при спуске плоской сплошной единицы на воду, выгрузке её из воды, когда возникает дополнительная сила при отрыве от зеркала воды, а также при транспортировке плоской сплошной единицы по водным путям, т. к. данный процесс является нестабильным, с постоянно изменяющимися действующими внешними силами на сплошную единицу. Поэтому $[k_{3ПП}]$ вводится при расчёте предельно допустимого напряжения в прокладках и для данных условий устанавливается экспериментальным путём. Коэффициент учёта влажности древесины прокладок принимается тогда, когда предельно допускаемое напряжение при изгибе берётся при одной влажности, а фактическая влажность верхних прокладок другая. Согласно работе [41], предел прочности при влажности древесины 12 % больше, чем при влажности 30 % и более. Таким образом, коэффициент учёта влажности древесины прокладки принимается равным 1,7—1,8, если значение предельно допускаемого напряжения при изгибе взято для влажности 12 %, а фактическая влажность древесины больше 30 %. В свою очередь, данный коэффициент принимается равным 0,5—0,6, если значение предельно допускаемого напряжения при изгибе взято для влажности больше 30 %, а фактическая влажность древесины составляет 12 %. В том случае, когда предельно допускаемое напряжение при изгибе, например, взято для влажности 12 % и фактическая влажность древесины верхних прокладок составляет 12 %, коэффициент $k_{BD} = 1,0$.

Из условия прочности (2) выразим осевой момент сопротивления сечения верхней прокладки:

$$W_{BП} = \frac{M_{\max BП}}{[\sigma_H]}. \quad (4)$$

В зависимости (4) максимальный изгибающий момент в поперечном сечении верхней прокладки, с учётом рекомендаций исследований [29], [30], составит:

$$M_{\max BП} = P_{ПСЕ} l_{TC} = 0,25 G_{ПСЕ} l_{TC}, \quad (5)$$

где $P_{ПСЕ}$ — сосредоточенная сила, Н; $G_{ПСЕ}$ — вес плоской сплошной единицы, Н; l_{TC} — расстояние от реакции опоры до точки приложения сосредоточенной силы, м.

Максимальный изгибающий момент в сечении считается положительным [29], если он вызывает сжатие в верхних волокнах прокладок, а отрицательным, когда он вызывает растяжение в верхних волокнах прокладок, поэтому для удобства расчёта зависимость (5) примет вид:

$$|M_{\max B\Pi}| = |P_{\Pi CE} l_{TC}| = |0,25G_{\Pi CE} l_{TC}|. \quad (6)$$

Обуславливаемся, что верхняя прокладка имеет круглое поперечное сечение, тогда осевой момент сопротивления сечения $W_{B\Pi}$, согласно исследованиям [29], [30], будет рассчитываться следующим образом:

$$W_{B\Pi} = \frac{\pi d_{B\Pi}^3}{32}, \quad (7)$$

где π — число «пи», равное 3,14; $d_{B\Pi}$ — диаметр верхней прокладки в верхнем отрезе, м.

Учитывая зависимости (5)–(7) и подставив их в равенство (4), выразим общую зависимость для определения минимального диаметра $d_{\sigma \min B\Pi}$ верхней прокладки в верхнем отрезе:

$$d_{\sigma \min B\Pi} = \sqrt[3]{32 \frac{|0,25G_{\Pi CE} l_{TC}|}{\pi [\sigma_H]}}. \quad (8)$$

Используя зависимость (8), с учётом формулы (3) запишем ключевые равенства расчёта минимального диаметра верхней прокладки для схем распределения нагрузок, представленных на рисунках 2а, 2б и 2в соответственно:

$$d_{\sigma \min B\Pi} = \sqrt[3]{32 [k_{3\Pi\Pi}] k_{BD} \frac{|0,25G_{\Pi CE} l_{TC}|}{\pi \sigma_{Hnp\delta}}}; \quad (9)$$

$$d_{\sigma \min B\Pi} = \sqrt[3]{32 [k_{3\Pi\Pi}] k_{BD} \frac{|-0,25G_{\Pi CE} l_{TC}|}{\pi \sigma_{Hnp\delta}}}; \quad (10)$$

$$d_{\sigma \min B\Pi} = \sqrt[3]{32 [k_{3\Pi\Pi}] k_{BD} \frac{|-0,25G_{\Pi CE} l_{TC}|}{\pi \sigma_{Hnp\delta}}}. \quad (11)$$

Зависимости (9)–(11) являются конечными формулами для расчёта минимально допустимого диаметра в верхнем отрезе верхних прокладок при возникновении в них нормального напряжения. При этом в зависимости от того, как будет подниматься сплотовочная единица и в каком месте будут зацепляться чокерные захваты, l_{TC} в равенствах (9)–(11) для каждого варианта устанавливается индивидуально. Если рассматривать практичность зацепления чокерных захватов при поднятии сплотовочной единицы, то наиболее целесообразно осуществлять зацепление чокерных захватов после колец. Таким образом, l_{TC}

для равенства (9) составит $l_{3ДП}$, а для равенства (10) l_{TC} равно $0,5d_{СВП}$, но в практических условиях l_{TC} целесообразно определять расчётным путём.

Касательное напряжение $\tau_{BП}$, которое будет возникать в верхней прокладке при действии на неё силы сосредоточения, для представленных схем на рисунке 2, с условием, что сечение прокладки имеет форму в виде круга [29], [30], следует рассчитывать по формуле

$$\tau_{BП} = \frac{4}{3} \frac{Q_{BП}}{F_{BП}}, \quad (12)$$

где $Q_{BП}$ — поперечная сила, возникающая в исследуемом поперечном сечении верхней прокладки, Н; $F_{BП}$ — площадь поперечного сечения верхней прокладки, м².

На основании равенства (12) условие прочности примет вид:

$$\tau_{\max BП} = \frac{4}{3} \frac{Q_{BП}}{F_{BП}} \leq [\tau_H], \quad (13)$$

где $\tau_{\max BП}$ — максимальное касательное напряжение, возникающее в верхней прокладке, Па; $[\tau_H]$ — допускаемое касательное напряжение при изгибе, Па.

В условии прочности (13) $[\tau_H]$ принимаем $[\tau_H] = 0,6[\sigma_H]$ согласно работе [29].

Из условия прочности (13) выразим площадь поперечного сечения верхней прокладки:

$$F_{BП} = \frac{4}{3} \frac{Q_{BП}}{[\tau_H]}. \quad (14)$$

Зная, что в зависимости от направления действия силы сосредоточения $P_{ПСЕ}$ на верхнюю прокладку поперечная сила, возникающая в исследуемом поперечном сечении, может иметь положительное или отрицательное значение $Q_{BП} = \pm P_{ПСЕ}$, для удобства расчёта запишем следующее условие:

$$|Q_{BП}| = |\pm P_{ПСЕ}| = |\pm 0,25G_{ПСЕ}|. \quad (15)$$

Преобразуем формулу (14) с учётом формулы (15), в результате получим:

$$\frac{\pi d_{BП}^2}{4} = \frac{4}{3} \frac{|\pm 0,25G_{ПСЕ}|}{[\tau_H]}. \quad (16)$$

Учитывая, что $[\tau_H] = 0,6[\sigma_H]$, выразим из равенства (16) минимально допустимый диаметр $d_{\tau \min BП}$ верхней прокладки в верхнем отрезе:

$$d_{\tau \min BП} = \sqrt{\frac{80}{9} \frac{[k_{3ДП}] k_{BД} |\pm 0,25G_{ПСЕ}|}{\pi \sigma_{Hnpd}}}. \quad (17)$$

Зависимость (17) является конечной формулой для расчёта минимально допустимого диаметра в верхнем отрезе верхних прокладок при возникновении в них касательного напряжения. Следует отметить, что расчёт минимально допустимого диаметра $d_{\tau \min BП}$

верхних прокладок по зависимости (17) справедлив для всех схем, представленных на рисунке 2. При этом результаты расчёта $d_{\sigma_{\min B\Pi}}$ по зависимостям (9)–(11) и расчёта $d_{\tau_{\min B\Pi}}$ по зависимости (17) сравниваются между собой, принимается наибольший диаметр, который округляется в большую сторону. Он и станет определяющим при выборе диаметра в верхнем отрезе верхних прокладок плоской сплошной единицы.

Расчёт прочности нижних прокладок плоской сплошной единицы сводится к определению их минимального диаметра в верхнем отрезе, который будет зависеть от возникающих при изгибе нормального напряжения $\sigma_{H\Pi}$ и касательного напряжения $\tau_{H\Pi}$.

Из схемы распределения нагрузки от веса плоской сплошной единицы на нижнюю прокладку, которая представлена на рисунке 3, видно, что реакции опор R_A и R_B возникают в точках A и B , т. е. в местах контакта прокладки с кольцами с ребристой внутренней поверхностью. Для удобства расчёта обуславливаемся, что погонная нагрузка $q_{H\Pi}$, возникающая от веса плоской сплошной единицы при поднятии её за верхние прокладки, действует на нижнюю прокладку между кольцами по всей длине. При этом реакции опор R_A и R_B будут направлены в противоположную сторону действия погонной нагрузки $q_{H\Pi}$. На основании вышесказанного расчёт минимально допустимого диаметра в верхнем отрезе нижней прокладки будем осуществлять согласно принятым допущениям, не влияющим на достоверность производимых расчётов.

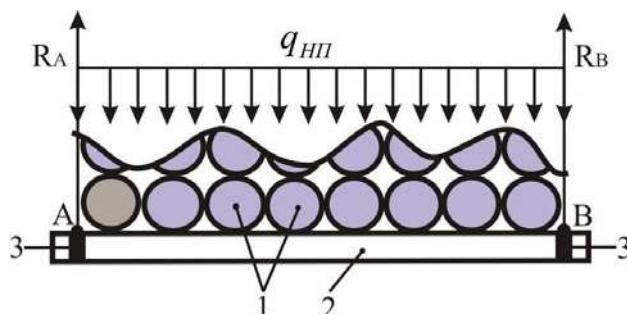


Рисунок 3. Схема распределения нагрузок на нижнюю прокладку: 1 — нижний ряд круглых лесоматериалов; 2 — нижняя прокладка; 3 — кольцо с ребристой внутренней поверхностью

Figure 3. The scheme of distribution of loads on the lower sticker: 1 – the lower row of round timber; 2 – the lower sticker; 3 – a ring with a ribbed inner surface

Учитывая равенство (2), при возникновении в поперечном сечении нижней прокладки нормального напряжения $\sigma_{H\Pi}$ условие прочности нижней прокладки можно записать следующим образом:

$$\sigma_{\max H\Pi} = \frac{M_{\max H\Pi}}{W_{H\Pi}} \leq [\sigma_H], \quad (18)$$

где $\sigma_{\max H\Pi}$ — максимальное напряжение, возникающее в нижней прокладке от действия погонной нагрузки, Па; $M_{\max H\Pi}$ — максимальный изгибающий момент в поперечном сечении нижней прокладки, Н·м; $W_{H\Pi}$ — осевой момент сопротивления сечения нижней прокладки, м³.

Из условия прочности нижней прокладки выражим осевой момент сопротивления сечения:

$$W_{H\Pi} = \frac{M_{\max H\Pi}}{[\sigma_H]}. \quad (19)$$

В формуле (19) осевой момент сопротивления сечения равен [29]:

$$W_{H\Pi} = \frac{\pi d_{H\Pi}^3}{32}, \quad (20)$$

где $d_{H\Pi}$ — диаметр нижней прокладки в верхнем отрезе, м.

Максимальный изгибающий момент в поперечном сечении нижней прокладки, согласно исследованиям [29], [30], составит:

$$M_{\max H\Pi} = \frac{q_{H\Pi} l_{PK}^2}{8}, \quad (21)$$

где $q_{H\Pi}$ — погонная нагрузка, Н/м; l_{PK} — расстояние между кольцами с ребристой внутренней поверхностью, м.

Погонная нагрузка для нижней прокладки равна:

$$q_{H\Pi} = 0,5 \frac{G_{HCE}}{l_{PK}}. \quad (22)$$

Подставив выражение (22) в равенство (21), получим зависимость:

$$M_{\max H\Pi} = \frac{G_{HCE} l_{PK}}{16}. \quad (23)$$

Учитывая зависимости (20) и (23) и подставив их в условие прочности (19), запишем равенство:

$$\frac{\pi d_{H\Pi}^3}{32} = \frac{G_{HCE} l_{PK}}{16 [\sigma_H]}. \quad (24)$$

Зная, что $[\sigma_H] = \frac{\sigma_{H\text{прд}}}{[k_{3H\Pi}] k_{BD}}$, подставим данную формулу в равенство (24) и выразим

минимально допустимый диаметр в верхнем отрезе нижней прокладки $d_{\sigma_{\min H\Pi}}$:

$$d_{\sigma_{\min H\Pi}} = \sqrt[3]{[k_{3H\Pi}] k_{BD} \frac{2G_{HCE} l_{PK}}{\pi \sigma_{H\text{прд}}}}. \quad (25)$$

Формула (25) — расчёт минимального диаметра в верхнем отрезе нижних прокладок при возникновении в них нормального напряжения, при этом $l_{PK} = n_{BP}d_{CVP}$, где n_{BP} — количество уложенных круглых лесоматериалов в верхнем или нижнем ряду, шт.; d_{CVP} — средний диаметр уложенных круглых лесоматериалов в верхнем или нижнем ряду, м.

В нижней прокладке плоской сплошной единицы, как уже отмечалось выше, возникает касательное напряжение τ_{HP} , тогда с учётом равенства (13), при условии, что сечение круглое, условие прочности будет выглядеть следующим образом:

$$\tau_{\max HP} = \frac{4}{3} \frac{Q_{HP}}{F_{HP}} \leq [\tau_H], \quad (26)$$

где $\tau_{\max HP}$ — максимальное поперечное напряжение, возникающее в нижней прокладке, Па; Q_{HP} — поперечная сила, возникающая в исследуемом поперечном сечении нижней прокладки, Н; F_{HP} — площадь поперечного сечения нижней прокладки, м².

Для рассматриваемого случая поперечная сила Q_{HP} , возникающая в исследуемом поперечном сечении, определяется по формуле

$$|Q_{HP}| = \left| \pm \frac{q_{HP} l_{PK}}{2} \right|. \quad (27)$$

Из условия прочности (25) выразим площадь поперечного сечения нижней прокладки F_{HP} :

$$F_{HP} = \frac{4}{3} \frac{Q_{HP}}{[\tau_H]}. \quad (28)$$

Учитывая равенства (22) и (27) и условие, что $[\tau_H] = 0,6\sigma_{Hnpd}$ [29], запишем зависимость (28) в развёрнутом виде:

$$\frac{\pi d_{HP}^2}{4} = \frac{4}{3} \frac{|\pm 0,25G_{PCE}|}{0,6[\sigma_H]}. \quad (29)$$

Используя равенство (3) и подставив его в выражение (29), выразим минимально допустимый диаметр $d_{\tau_{\min HP}}$ нижней прокладки в верхнем отрезе:

$$d_{\tau_{\min HP}} = \sqrt{\frac{80}{9} \frac{[k_{3HP}] k_{BD} |\pm 0,25G_{PCE}|}{\pi \sigma_{Hnpd}}}. \quad (30)$$

Равенство (30) является конечным результатом расчёта минимального диаметра в верхнем отрезе нижних прокладок при возникновении в них касательного напряжения.

При расчёте минимально допустимого диаметра в верхнем отрезе нижних прокладок $d_{\sigma_{\min HP}}$ и $d_{\tau_{\min HP}}$ соответственно по формулам (25) и (30) результаты сравниваются между собой и принимается наибольший диаметр из расчётных, который округляется в большую

сторону. Данный диаметр будет определяющим при выборе диаметра в верхнем отрезе нижних прокладок плоской сплоточной единицы.

Следует отметить, что минимально допустимый диаметр верхних и нижних прокладок в верхнем отрезе при возникновении в них касательного напряжения определяется по одинаковым формулам. Тогда можно записать следующее равенство:

$$d_{\tau \min BI} = d_{\tau \min HI} = \sqrt{\frac{80}{9} \frac{[k_{3PP}] k_{BD} |\pm 0,25G_{PCE}|}{\pi \sigma_{H \text{prod}}}}. \quad (31)$$

Если спуск на воду плоской сплоточной единицы, выгрузка её из воды, а также транспортировка не предусматривают поднятие её за верхние прокладки или за крайние круглые лесоматериалы верхнего ряда, то выбор диаметров в верхнем отрезе верхних и нижних прокладок рекомендуется также осуществлять по приведённой методике расчёта и принимать минимально допустимый расчётный диаметр, т. к. во время сплава самосплавом или в составе плата на сплоточную единицу могут воздействовать внешние силы, силы распора и т. д., а принцип выбора диаметра по приведённой методике будет обеспечивать гарантированную прочность плоской сплоточной единицы.

Расчёт прочности колец с ребристой внутренней поверхностью, сварных цепей и талрепы сводится к определению минимально допустимого поперечного сечения при растяжении составляющих сплоточного такелажа. При этом обуславливается, что собственный вес сплоточного такелажа не учитывается.

Кольца с ребристой внутренней поверхностью, которые находятся на нижних и верхних прокладках, будут испытывать растяжение, возникающее от веса плоской сплоточной единицы при поднятии её за верхние прокладки, т. е. в поперечном сечении каждого кольца будет возникать продольная растягивающая сила N_{KPI} , формирующаяся от нагрузки, которую воспринимает каждое кольцо P_{PCE} (рисунок 4). Причём всеми изгибающими моментами, возникающими в каждом кольце, пренебрегаем, т. к. при нормальной эксплуатации сплоточного такелажа их значения невысокие и их влияние можно учесть через коэффициент. При действии на кольцо с ребристой внутренней поверхностью нагрузки в сечении кольца будет возникать нормальное напряжение, которое для данных условий, с учётом исследований [29—40], [42], следует определять по формуле

$$\sigma_{KPI} = \frac{N_{KPI}}{F_{KPI}}, \quad (32)$$

где N_{KPI} — продольная растягивающая сила в поперечном сечении кольца, Н; F_{KPI} — площадь поперечного сечения кольца, м².

Условие прочности кольца запишется следующим образом:

$$\sigma_{\max KPI} = \frac{N_{\max KPI}}{2F_{KPI}} \leq [\sigma_p], \quad (33)$$

где $\sigma_{\max KРП}$ — максимальное напряжение, возникающее в поперечном сечении кольца, Па; $N_{\max KРП}$ — максимальная продольная растягивающая сила, возникающая в поперечном сечении кольца, Н; $[\sigma_p]$ — допускаемое напряжение при растяжении, Па.

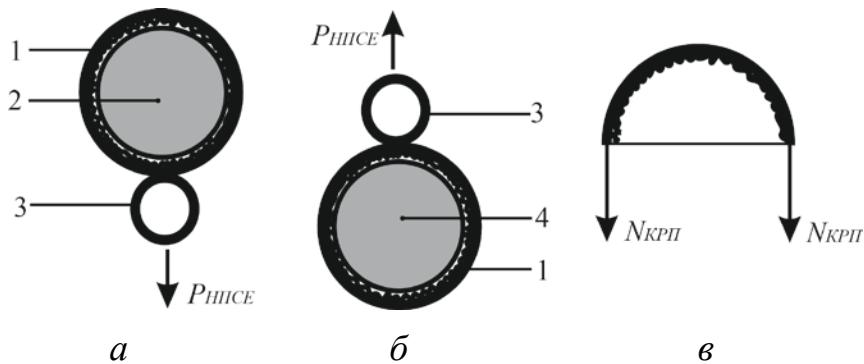


Рисунок 4. Схема распределения нагрузок на кольцо с ребристой внутренней поверхностью: **(а)** — расположение нагрузки на кольцо на верхней прокладке; **(б)** — расположение нагрузки на кольцо на нижней прокладке; **(в)** — расположение нагрузки на кольцо на нижней прокладке; 1 — кольцо с ребристой внутренней поверхностью; 2 — верхняя прокладка; 3 — цепь; 4 — нижняя прокладка

Figure 4. Load distribution scheme for a ring with a ribbed inner surface: **(a)** the location of the load on the ring on the upper sticker; **(b)** the location of the load on the ring on the lower sticker; **(c)** the location of the load on the ring on the lower sticker; 1 – ring with a ribbed inner surface; 2 – upper sticker; 3 – chain; 4 – bottom sticker

В условии прочности кольца (33) максимальная продольная растягивающая сила, возникающая в поперечном сечении кольца $N_{\max KРП}$, определяется из выражения

$$N_{\max KРП} = P_{HPICE} = 0,25G_{HPICE}, \quad (34)$$

где P_{HPICE} — нагрузка, которую воспринимает кольцо от веса плоской сплошной единицы, Н.

Допустимое напряжение при растяжении с учётом ряда коэффициентов [43] рассчитывается по формуле

$$[\sigma_p] = \frac{\sigma_{P_{npo}} k_{PRH}}{[k_{3PP}]}, \quad (35)$$

где $\sigma_{P_{npo}}$ — предельно допускаемое напряжение при растяжении, Па; k_{PRH} — коэффициент понижения расчётного напряжения за счёт явлений изгиба и ослабления сваркой, равный 0,64 [43]; $[k_{3PP}]$ — коэффициент запаса прочности при растяжении.

Коэффициент запаса прочности при растяжении $[k_{3PP}]$ в источнике [43] для сварных цепей в зависимости от условий работы принимается равным 4—7. Так как кольца с ребристой

внутренней поверхностью, сварные цепи и талрепы будут эксплуатироваться в различных условиях плавания плоских сплоточных единиц, для расчёта прочности сплоточного такелажа следует принимать данный коэффициент не менее 4.

Из условия прочности кольца выразим площадь его поперечного сечения:

$$F_{KPP} = \frac{N_{\max KPP}}{2[\sigma_p]}. \quad (36)$$

Площадь поперечного сечения кольца представим следующим образом:

$$F_{KPP} = l_{KPP} b_{KPP}, \quad (37)$$

где b_{KPP} — толщина кольца с ребристой внутренней поверхностью, м; l_{KPP} — ширина кольца с ребристой внутренней поверхностью, устанавливаемая расчётным путём, м.

Подставим выражения (34), (35) и (37) в равенство (36) и сделаем ряд преобразований, в результате получим минимально допустимую толщину кольца:

$$b_{\min KPP} = \frac{[k_{3PP}]G_{PCE}}{8k_{PPE}l_{KPP}\sigma_{Ppro}}. \quad (38)$$

Следует отметить, что при расчёте прочности колец акцент был поставлен на определение их толщины, т. к. ширина колец для уменьшения длины прокладок всегда будет лимитироваться и устанавливаться перед расчётом на прочность сплоточного такелажа. Если кольца с ребристой внутренней поверхностью не имеют сварных швов, то коэффициент k_{PPE} необходимо увеличить при соблюдении условия $k_{PPE} \leq 1$.

Расчёт на прочность при растяжении сварных цепей сплоточного такелажа, как правило, сводится к определению диаметра звена. При этом для уменьшения количества сварных соединений каждое кольцо может изначально продеваться в звено цепи, а звено цепи свариваться. Таким образом, при поднятии плоской сплоточной единицы за верхние прокладки в поперечном сечении цепи, как и в кольцах с ребристой внутренней поверхностью, будет возникать продольная растягивающая сила N_{CQ} , образующаяся от нагрузки P_{HPC} , которую воспринимают сварные цепи, а все изгибающие моменты, возникающие в цепи, выразим через коэффициент k_{PPE} .

Условие прочности сварной цепи запишется следующим образом:

$$\sigma_{\max CQ} = \frac{N_{\max CQ}}{2F_{3CQ}} \leq [\sigma_p], \quad (39)$$

где $\sigma_{\max CQ}$ — максимальное напряжение, возникающее в поперечном сечении сварной цепи, Па; $N_{\max CQ}$ — максимальная продольная растягивающая сила, возникающая в поперечном сечении сварной цепи, Н; F_{3CQ} — площадь поперечного сечения звена сварной цепи, м².

Из условия прочности сварной цепи (39) выразим площадь поперечного сечения:

$$F_{3СЦ} = \frac{N_{\max СЦ}}{2[\sigma_P]}. \quad (40)$$

Площадь поперечного сечения звена сварной цепи $F_{3СЦ}$ следует рассчитывать по формуле

$$F_{3СЦ} = \frac{\pi d_{3СЦ}^2}{4}, \quad (41)$$

где $d_{3СЦ}$ — диаметр звена сварной цепи, м.

С учётом того, что $N_{\max СЦ} = P_{НПСЕ} = 0,25G_{ПСЕ}$, подставив зависимости (35) и (41) в равенство (40) и сделав ряд преобразований, определим минимально допустимый диаметр звена сварной цепи:

$$d_{\min 3СЦ} = \sqrt{\frac{[k_{3ПР}]G_{ПСЕ}}{2\pi k_{ПРН}\sigma_{P_{нрд}}}}. \quad (42)$$

Выражение (42) представляет собой формулу для расчёта минимально допустимого диаметра звена сварных цепей сплоточного такелажа. В данном случае коэффициент $k_{ПРН}$ принимается равным 0,64, согласно рекомендациям [43], т. к. в сварной цепи присутствуют сварные швы, а при её растяжении возникают изгибающие моменты.

Талрепа представляет собой штамповую муфту, имеющую корпус с резьбовыми отверстиями, в которые вкручены резьбовые стержни с контргайками. В практических условиях для исключения проведения расчёта талрепы на прочность наиболее целесообразно воспользоваться заданной производителем максимальной нагрузкой, которую может выдержать талрепа на протяжении длительного времени. Каждый вид талрепы имеет свою допускаемую нагрузку. Запишем основное условие выбора талрепы:

$$0,25[k_{3ПР}]G_{ПСЕ} \leq P_{ДНТ}, \quad (43)$$

где $P_{ДНТ}$ — допускаемая нагрузка для применяемого вида талрепы, Н.

4. Обсуждение и заключение

Модернизированная плоская сплоточная единица имеет ряд преимуществ над известными сплоточными единицами: простота конструкции, высокая прочность и возможность машинной сборки. Достижение указанных преимуществ реализовано за счёт укладки рядов круглых лесоматериалов между верхними и нижними прокладками, которые соединяются между собой с помощью сплоточного такелажа. Практическое использование данной плоской сплоточной единицы на первоначальном сплаве лесоматериалов требует

обоснования основных транспортно-эксплуатационных показателей, но особое внимание необходимо уделить расчёту прочности сплоточной единицы.

Для рассматриваемой плоской сплоточной единицы обеспечение прочности заключается в правильном обосновании параметров нижних и верхних прокладок, колец с ребристой внутренней поверхностью, сварных цепей и талрепы. Предложена методика расчёта параметров нижних и верхних поперечных прокладок, а также сплоточного такелажа, где в обязательном порядке учитывалась максимальная сила, действующая на прокладки и сплоточный такелаж, предельно допускаемое напряжение материала, из которых они изготавливаются, и комплекс основных коэффициентов запаса прочности. В результате этого для нижних и верхних поперечных прокладок были получены формулы расчёта диаметра в верхнем отрезе, установлены зависимости для расчёта толщины колец с ребристой внутренней поверхностью и диаметра сварной цепи, определено условие выбора талрепы.

Рассмотренная конструкция плоской сплоточной единицы может быть использована как на первоначальном сплаве лесоматериалов, так и на магистральном. Условие её использования на первоначальном сплаве лесоматериалов — это сплав вольницей или в составе линейки за тягой буксировщика. На магистральном сплаве лесоматериалов данная плоская сплоточная единица транспортируется только в составе плота.

Список литературы

1. Водный кодекс Российской Федерации: текст с последними изм. и доп. на 2022 г. М.: Эксмо, 2022. 64 с. (Законы и кодексы).
2. Васильев В. В., Афоничев Д. Н. Усовершенствованные системы плотового сплава лесоматериалов: [монография]. Saarbrucken (Германия): Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 284 с.
3. Васильев В. В. Модернизированный плот для рек с малыми глубинами // Вестник ПГТУ. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2015. № 1. С. 45—58.
4. Васильев В. В., Афоничев Д. Н. Использование плоских сплоточных единиц на первоначальном сплаве лесоматериалов // Известия вузов. Лесной журнал. 2022. № 1. С. 128—142. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-128-142.
5. 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. Р. 765—772.
6. Посыпанов С. В. Определение геометрических параметров плавающего транспортного пакета круглых лесоматериалов численным методом // Известия вузов. Лесной журнал. 2017. № 1. С. 141—153. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.1.141.
7. Посыпанов С. В. Определение геометрических характеристик двухъярусной пакетной сплоточной единицы, расположенной на твёрдом основании // Известия вузов. Лесной журнал. 2019. № 5. С. 135—147. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.135.
8. Васильев В. В., Афоничев Д. Н. Обоснование показателя гибкости плота из сплоточных единиц // Известия вузов. Лесной журнал. 2022. № 4. С. 146—155. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-146-155.

9. Васильев В. В. Особенности формирования осадки плоской сплоточной единицы // Лесотехнический журнал ВГЛТА. 2014. № 1 (13). С. 79—84.
10. Васильев В. В., Афоничев Д. Н. Расчёт прочности гибкого водонепроницаемого материала плоских сплоточных единиц со стабилизированным запасом плавучести // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 2. С. 77—102. DOI: 10.15393/j2.art.2022.6203.
11. Васильев В. В. Расчёт транспортно-эксплуатационных показателей усовершенствованной плоской сплоточной единицы // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 4. С. 1—22. DOI: 10.15393/j2.art.2022.6365.
12. Васильев В. В. Обоснование параметров транспортно-технологической схемы поставки древесины в плоских сплоточных единицах по принципу плот (линейка) — плот // Resources and Technology. 2021. Т. 18, № 2. С. 48—78. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5603.
13. Васильев В. В. Транспортно-технологическая схема поставки древесины водным транспортом в плоских сплоточных единицах по принципу плоская сплоточная единица — плот // Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм: Материалы междунар. научно-практич. онлайн-конф.; г. Воронеж, 17—19 ноября 2020 г. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», 2020. С. 335—340.
14. Васильев В. В., Аксенов И. И. Транспортно-технологическая схема поставки лесоматериалов потребителям в плоских сплоточных единицах по принципу плоская сплоточная единица — баржа // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы междунар. научно-практич. конф. г. Воронеж 24—25 ноября 2020 г. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ», 2020. С. 30—33.
15. Патент 2456200 РФ, МПК B63B 35/62. Сплоточная единица / В. В. Васильев; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежская государственная лесотехническая академия» (RU). № 2011108194/11; заявл. 02.03.2011; опубл. 20.07.2012, Бюл. № 20. 6 с.
16. Патент 2460679 РФ, МПК B65G 69/20, B65B 27/10. Плоская сплоточная единица / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежская государственная лесотехническая академия» (RU). № 2011109353/13; заявл. 11.03.2011; опубл. 10.09.2012, Бюл. № 25. 7 с.
17. Brevet 2882723 FR, Int. Cl. 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.
18. Патент 2477698 РФ, МПК B63B 35/62, B65B 27/10. Плоская сплоточная единица / Е. М. Царев, П. Ф. Войтко, С. В. Ерин, А. В. Поляков, Д. В. Самарин; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Марийский государственный технический университет» (RU). № 2011128866/11; заявл. 12.07.2011; опубл. 20.03.2013, Бюл. № 8. 7 с.
19. Brevet 1461583 FR, Int. Cl. B63b, B65g. Remorquage de billes de bois / Société anonyme dite: compagnie maritime des chargeurs réunis résidant en France (Seine). No. 36,157; la date de la demandé 26.10.1965; la date de publié 02.10.1966. 4 p.
20. Brevet 1286734 FR, Int. Cl. B65g. Procédé de flottage des bois en grumes et dispositif d'attache pour la mise en oeuvre de ce procédé / M. Roger Jandin résidant en France; la date de la demandé 23.01.1961; la date de publié 29.01.1962. 4 p.

21. Patent 57167892 JP, Int. CI. B63B 35/58, B65G 1/00. Water surface receiving tools for driftwood / Kitai Toshiro; Kitai Tekkoshokk. No. 56053830; date of filing 10.04.1981; date of publication of application 15.10.1982.
22. Patent 3662413 USA, Int. CI.2 B63b 35/00. Metal ring for fastening parts by means of ocean wave force / Toshiro Andoh; Toshiro Andoh. No. 10,354; filed: 13.04.1970; date application 16.05.1972.
23. 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.
24. Patent 2961671 USA, Int. CI.9-15 B63B 35/62. Bundle raft with quick detachable fitting / William A. Meighan, Portland, Oreg. No. 684,450; filed: 17.09.1957; date application 29.11.1960.
25. 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.
26. 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.
27. Патент 2777674 РФ, МПК B65B 35/02, B65G 69/20. Плоская сплоточная 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 имени Г. Ф. Морозова» (RU). № 2021140068; заявл. 30.12.2021; опубл. 08.08.2022, Бюл. № 22. 8 с.
28. Патент 199681 РФ, МПК B65G 69/00, 57/18. Сплоточная машина / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, В. А. Морковин, Е. В. Поздняков; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова» (RU). № 2020119839; заявл. 08.06.2020; опубл. 14.09.2020, Бюл. № 26. 5 с.
29. Любомиц М. И., Іцкович Г. М. Справочник по сопротивлению материалов. Второе изд., перераб. и доп. Минск: Вышэйшая школа, 1969. 464 с.
30. Биргер И. А. Сопротивление материалов: Учеб. пособие. М.: Наука, 1986. 560 с.
31. Belyayev N. M. Problems in strength of materials. Elsevier, 1966. 539 p.
32. Stephens R. C. Strength of materials. Theory and examples. Edward Arnold, 1970. 314 p.
33. Vitor Dias da Silva. Mechanics and strength of materials. Springer, 2006. 531 p.
34. Patnaik S., Hopkins D. Strength of materials: a new unified theory for the 21st century. Butterworth; Heinemann (Elsevier), 2004. 771 p.
35. Boresi A. P., Schmidt R. J., Sidebottom O. M. Advanced mechanics of materials. Wiley, 1993. 827 p.
36. Strength of Materials and Structures, Fourth Edition / Carl T. F. Ross BSc PhD DSc CEng FRINA, The late John Case, A. Chilver. Arnold, 1999. 719 p.
37. Broutman L. Interfaces in composites. ASTM, 1968. 198 p.
38. Den Hartog J. P. Strength of materials. Dover Publications, 1961. 346 p.
39. Skalmierski B. Mechanics and strength of materials. Academic Press, Elsevier, 1979. 435 p.
40. Komarovskiy A., Astakhov V. Physics of strength and fracture control: adaptation of engineering materials and structures. CRC Press, 2002. 629 p.
41. Перельгин Л. М., Уголев Б. Н. Древесиноведение. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 285 с.
42. Michael F. Ashby. Materials selection in mechanical design. Butterworth-Heinemann (Elsevier), 2005. 603 p.

43. Заводчиков Д. А. Грузоподъёмные машины. Второе изд., доп. и перераб. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1962. 312 с.

References

1. The Water Code of the Russian Federation: the text with the latest amendments and additions for 2022. Moscow, Eksmo, 2022. 64 p. (Laws and Codes). (In Russ).
2. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. *Improved systems of raft timber alloy: [monograph]*. Saarbrucken (Germany), Publishing house LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 284 p. (In Russ).
3. Vasiliev V. V. Modernized raft for rivers with shallow depths. *Vestnik PSTU. Series: Forest. Ecology. Environmental management PSTU*, 2015, no. 1, pp. 45—58. (In Russ.).
4. 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.).
5. 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.
6. Posypanov S. V. Determination of geometric parameters of a floating transport package of round timber by numerical method. *Izvestiy vuzov. Lesnoi zhurnal*, 2017, no. 1, pp. 141—153. doi: 10.17238/issn0536-1036.2017.1.141. (In Russ).
7. Posypanov S. V. Determination of geometric characteristics of a two-tier batch unit located on a solid base. *Izvestiy vuzov. Lesnoi zhurnal*, 2019, no. 5, pp. 135—147. doi: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.135. (In Russ).
8. 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).
9. 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.).
10. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. Calculation of the strength of a flexible waterproof material of flat flat units with a stabilized buoyancy reserve. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 77—102. doi: 10.15393/j2.art.2022.6203. (In Russ).
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. Substantiation of the parameters of the transport and technological scheme for the supply of wood in flat raft units according to the raft (ruler) — raft principle. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, no. 2, pp. 48—78. doi: 10.15393/j2.art.2021.5603. (In Russ.).
13. Vasiliev V. V. Transport and technological scheme of wood supply by water transport in flat-flow units according to the principle of flat-flow unit — raft. *Arctic: innovative technologies, personnel, tourism: materials of international scientific practice. Online conferences. Voronezh, November 17—19, 2020*. Voronezh, Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov, 2020, pp. 335—340. (In Russ.).
14. Vasiliev V. V., Aksenov I. I. Transport and technological scheme of timber supply to consumers in flat-flow units according to the principle of flat-flow unit — barge. *Science and education at the present stage of development: experience, problems and solutions: materials of the*

international scientific and practical conference. Voronezh 24—25 November 2020. Voronezh, Voronezh State Agrarian University, 2020, pp. 30—33. (In Russ.).

15. Vasiliev V. V. Patent 2456200 R.F., IPC B63B 35/62. Cohesive unit. Applicant and patent holder State Educational Institution of Higher Professional Education Voronezh State Forestry Academy (RU). No. 2011108194/11; application 02.03.2011; publ. 20.07.2012, Bul. No. 20. 6 p. (In Russ.).
16. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. Patent 2460679 R.F., IPC B65G 69/20, B65B 27/10. Flat splice unit. Applicant and patent holder State Educational Institution of Higher Professional Education Voronezh State Forestry Academy (RU). No. 2011109353/13; application 11.03.2011; publ. 10.09.2012, Bul. No. 25. 7 p. (In Russ.).
17. 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.
18. Tsarev E. M., Voitko P. F., Erin S. V., Polyakov A. V., Samarin D. V. Patent 2477698 R.F., IPC B63B 35/62, B65B 27/10. Flat cohesive unit. Applicant and patent holder State Educational Institution of Higher Professional Education Mari State Technical University (RU). No. 2011128866/11; application 12.07.2011; publ. 20.03.2013, Bul. No. 8. 7 p. (In Russ.).
19. Patent 1461583 FR, Int. THIS. B63b, B65g. Towing of wooden logs. Société anonyme so-called: combined shippers shipping company residing in France (Seine). No. 36,157; the date from the requested 26.10.1965; the date of published 02.10.1966. 4 p.
20. Mr. Roger Jardin residing in France. Patent 1286734 FR, Int. THIS. B65g. Method of floating wood into logs and device for the implementation of this process; the date from the requested 23.01.1961; the date of published 29.01.1962. 4 p.
21. Kitai Toshiro; Kitai Tekkoshokk. Patent 57167892 JP, Int. CI. B63B 35/58, B65G 1/00. Water surface receiving tools for driftwood. No. 56053830; date of filing 10.04.1981; date of publication of application 15.10.1982.
22. Toshiro Andoh; Toshiro Andoh. Patent 3662413 USA, Int. CI.2 B63b 35/00. Metal ring for fastening parts by means of ocean wave force. No. 10,354; filed: 13.04.1970; date application 16.05.1972.
23. 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.
24. William A. Meighan, Portland, Oreg. Patent 2961671 USA, Int. CI.9-15 B63B 35/62. Bundle raft with quick detachable fitting. No. 684,450; filed: 17.09.1957; date application 29.11.1960.
25. 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.
26. Wilfred Spry Brodie, P. O. Box 175, Gibsons, British Columbia, VON 1VO, Canada. Patent 3971309 USA, Int. CI.2 B 63 B 27/16. Log bundling apparatus and method of bundling logs. No. 566,904; filed: 10.04.1975; date application 27.07.1976.
27. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Abramov V. V., Pozdnyakov E. V. Patent 2777674 RF, IPC B65B 35/02, B65G 69/20. 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. 2021140068; application 30.12.2021; publ. 08.08.2022, Byul. No. 22. 8 p. (In Russ.).
28. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Pozdnyakov E. V. Patent 199681 R.F., IPC B65G 69/00, 57/18. Splotch machine. Applicant and patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov (RU). No. 2020119839; application 08.06.2020; publ. 14.09.2020, Bul. No. 26. 5 p. (In Russ.).

29. Lyuboshits M. I., Itskovich G. M. *Handbook on the resistance of materials*. Second ed. of overwork. and add. Minsk, Vyshejshaya school, 1969. 464 p. (In Russ.).
30. Birger I. A. *Resistance of materials*. Textbook. Moscow, Nauka, 1986. 560 p. (In Russ.).
31. Belyayev N. M. *Problems in strength of materials*. Elsevier, 1966. 539 p.
32. Stephens R. C. *Strength of materials. Theory and examples*. Edward Arnold, 1970. 314 p.
33. Vitor Dias da Silva. *Mechanics and strength of materials*. Springer, 2006. 531 p.
34. Patnaik S., Hopkins D. *Strength of materials: a new unified theory for the 21st century*. Butterworth; Heinemann (Elsevier), 2004. 771 p.
35. Boresi A. P., Schmidt R. J., Sidebottom O. M. *Advanced mechanics of materials*. Wiley, 1993. 827 p.
36. Carl T. F. Ross BSc PhD DSc CEng FRINA, The late John Case, A. Chilver. *Strength of Materials and Structures, Fourth Edition*. Arnold, 1999. 719 p.
37. Broutman L. *Interfaces in composites*. ASTM, 1968. 198 p.
38. Den Hartog J. P. *Strength of materials*. Dover Publications, 1961. 346 p.
39. Skalmierski B. *Mechanics and strength of materials*. Academic Press, Elsevier, 1979. 435 p.
40. Komarovskiy A., Astakhov V. *Physics of strength and fracture control: adaptation of engineering materials and structures*. CRC Press, 2002. 629 p.
41. Perelygin L. M., Ugolev B. N. *Wood science*. Moscow, Forest industry, 1971. 285 p. (In Russ.).
42. Michael F. Ashby. *Materials selection in mechanical design*. Butterworth-Heinemann (Elsevier), 2005. 603 p.
43. Breeders D. A. *Lifting machines*. The second edition was supplemented and revised. Moscow, State Scientific and technical publishing house machine-building literature, 1962. 312 p. (In Russ.).

УДК 674.81

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6683

Статья

Классификация склонов оттаивающих почвогрунтов по геотехническим условиям их взаимодействия с движителями лесных машин

Каляшов Виталий Анатольевич

кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Российская Федерация), vit832@yandex.ru.

Шапиро Владимир Яковлевич

доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова (Российская Федерация), shapiro54vlad@mail.ru

Григорьев Игорь Владиславович

доктор технических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), silver73@inboxl.ru

Куницкая Ольга Анатольевна

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

Новиков Марат Семёнович

аспирант, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), novikov-ms@yakutskenergo.ru

Григорьева Ольга Ивановна

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

Получена: 5 января 2023 / Принята: 21 февраля 2023 / Опубликована: 26 февраля 2023

Аннотация: Постепенное истощение запасов спелых и перестойных лесов в доступных и удобных для освоения местностях приводит к необходимости освоения менее доступных лесных массивов. Большая часть лесного фонда Российской Федерации находится в зоне вечной мерзлоты. Леса криолитозоны,

как и леса на склонах гор и сопок, считаются одними из наиболее ранимых в экологическом плане. Значительная часть лесов криолитозоны находится на неудобных (по условиям рельефа) местностях — склонах гор и сопок, а также в условиях вечной мерзлоты, что относит их к возможно самым уязвимым в экологическом плане. В то же время необходимо эффективное освоение таких лесов. Исходя из особой сложности планирования работ в рассматриваемых условиях, как с точки зрения эксплуатационной, так и экологической эффективности, необходима научно обоснованная методическая поддержка принятия решений по выбору машин и оборудования и схеме освоения конкретной лесосеки. В статье представлено обоснование классификации прочности почвогрунтов и их соответствия геотехническим условиям лесозаготовок на склонах оттаивающих почвогрунтов, что позволяет оценить работоспособность трелёвочного волока (технологического коридора) и его эффективность при использовании различных лесных машин и трелёвочных систем.

Ключевые слова: леса на склонах; лесосечные работы; трелёвка; почвогрунты; леса на вечной мерзлоте

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6683

Article

Classification of slopes with thawing soils according to the geotechnical conditions of their interaction with the forest machine movers

Vitalij Kalyashov

Ph. D. in engineering, associate professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Russian Federation), vit832@yandex.ru

Vladimir Shapiro

D. Sc. in engineering, professor, Saint Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov (Russian Federation), shapiro54vlad@mail.ru

Igor Grigorev

D. Sc. in engineering, professor, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), silver73@inboxl.ru

Ol'ga Kunickaya

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

Marat Novikov

Ph. D. student, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), novikov-ms@yakutskenergo.ru

Olga Grigoreva

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

Received: 5 January 2023 / Accepted: 21 February 2023 / Published: 26 February 2023

Abstract: Gradual depletion of stocks of ripe and overgrown forests in accessible forests necessitates the development of less accessible woodlands. Most of the forest fund in the Russian Federation is located in permafrost zone. The forests of the cryolithic zone, as well as the forests on the slopes of mountains and hills, are considered the most vulnerable ones in ecological terms. A significant part of the forests in the cryolithic zone is located on inconvenient terrain that is on the slopes of mountains and hills. But effective forest exploitation of such forests is important. Based

on the particular complexity of work planning in the conditions under consideration, both from the point of view of operational and environmental efficiency, scientifically based methodological support for decision-making process is needed including the choice of machinery and equipment and the scheme of a specific cutting area exploitation. The article substantiates the classification of soil strength and its compliance with geotechnical conditions of logging on the slopes with thawing soils. The classification allows us to assess the operability of the skidding track (technological corridor) and its effectiveness when using various forest machines and skidding systems.

Keywords: forests on slopes; logging operations; skidding; soils; forests on permafrost

1. Введение

Эффективное транспортное освоение лесного фонда — лесных массивов, отдельных лесосек было и остаётся одной из наиболее актуальных проблем лесного комплекса Российской Федерации [1—4]. При планировании операций лесозаготовительного производства необходимо учитывать не только эффекты от работ, связанных с заготовкой и транспортировкой древесины, но и последующие временные и материальные затраты, касающиеся лесовосстановления [5—8]. Весьма значительное влияние на стоимость и эффективность лесовосстановительных работ оказывают параметры и показатели работы лесных машин и, особенно, трелёвочных систем на их базе, используемых на лесосечных работах [9], [10]. Необходимо учитывать, что неоптимально принятые решения при планировании лесосечных работ могут привести к кратному росту затрат на лесовосстановление, которые, соответственно, существенно снижают прибыль при заготовке древесины [11—13].

Взаимодействие лесной машины или трелёвочной системы с массивом оттаивающего грунта при лесозаготовительных работах на склонах гор и сопок в непосредственной близости от водонепроницаемой границы с зоной мерзлоты является сложным геотехническим процессом, характеризующимся многообразием случайных исходных данных и параметров [14]. К последним следует отнести, в первую очередь, геомеханическое состояние краевой части массива почвогрунта — его устойчивость и технологические свойства, под которыми будем понимать его прочностные свойства, с учётом наличия мёрзлых, оттаивающих и оттаявших участков, слагающих массив.

Параметры склона — его протяжённость, угол наклона плоскости к линии горизонта, местоположение зоны мерзлоты, температура и другие факторы влияют на прочность почвогрунта и, как следствие, работоспособность трелёвочного волока (технологического коридора) в процессе воздействия на него лесной машины или трелёвочной системы.

2. Материалы и методы

Рассматривая указанный процесс взаимодействия, следует отметить, что одним из показателей сопротивления почвогрунта статическим разрушающим нагрузкам является величина его прочности при одноосном сжатии R_c (кПа), поскольку величина R_c характеризует способность почвогрунта сопротивляться вертикальным сжимающим нагрузкам и её определение происходит при неограниченном боковом расширении, вплоть до момента предельного сопротивления сдвигу. Для условий взаимодействия на склонах, когда трелёвочный волок (технологический коридор) расположен на наклонной плоскости, учёт механизма сдвига почвогрунта является необходимым.

Показатель R_c является универсальной характеристикой прочности при сдвиге не только в процессе разрушения почвогрунтов, но и других сплошных сред, например, краевой части массива коры [15].

Основываясь на анализе огибающей кругов Мора в процессе формирования паспорта прочности Кулона, определение величины R_c оценивают в следующем виде [16]:

$$R_c = \frac{2C\cos\varphi}{1-\sin\varphi}, \quad (1)$$

где C — величина сцепления грунта, кПа, φ — угол внутреннего трения, $^{\circ}$.

Как следует из соотношения (1), величина R_c является функцией двух переменных прочности почвогрунта C и φ , которые зависят от изменения мощности H_{OT} слоя массива оттывающего почвогрунта на различных участках склона и его влажности ($W, \%$).

Следуя результатам исследования [17], отметим, что, приближаясь к вершине склона, влажность W почвогрунта достигает минимальных значений и стремится к нижнему пределу пластичности, или величине на границе раскатывания (W_p). Максимальные значения W установлены у основания склона, приближаясь к верхнему пределу пластичности, или величине на границе текучести (W_T). Введём показатель относительной влажности почвогрунта $K_W = \frac{W}{W_p}$.

Опытные данные [17] для четырёх видов оттывающих грунтов — супеси лёгкой, песка пылеватого, суглинка и супеси тяжёлой при изменении показателя K_W в широком диапазоне от 0,5 до 0,9 показали, что наибольшее снижение прочностных характеристик C и φ с ростом K_W отмечается для суглинка и супеси тяжёлой. Величины сцепления для них снижаются с 45 до 5—6 кПа (в 7,5—9 раз), углы внутреннего трения — с 32 до 10 $^{\circ}$ (в 3,2 раза). Для супеси лёгкой и песка аналогичные снижения составляют: для C — с 15—25 до 8—9 кПа (в 1,8—2,8 раза) и для φ — с 37 до 32—33 $^{\circ}$ (в 1,1—1,2 раза). Основываясь на соотношении (1), можно сделать вывод о том, что наибольшие снижения показателя прочности R_c с ростом влажности W на различных участках склона будут у суглинка и супеси тяжёлой.

Остановимся на выборе массива оттывающего почвогрунта, сложенного, в основном, суглинком. Статистическая обработка данных [17] с коэффициентом детерминации не ниже 0,965 позволила получить зависимости C , кПа и φ $^{\circ}$ от K_W :

$$C = 4,8924 K_W^{-3,39}, \varphi = 8,389 K_W^{-1,994}. \quad (2)$$

Пусть процесс взаимодействия лесной машины (трелёвочной системы на её базе) с краевой частью массива, содержащего слой оттывающего почвогрунта мощностью H_{OT} , осуществляется на склоне протяжённостью $L_c = 50$ м, с углом наклона α поверхности к линии горизонта и место контакта удалено на расстояние L от основания склона. Тогда безразмерный коэффициент $K_L = L/L_c, \%$ будет характеризовать меру относительного удаления контакта взаимодействия от основания склона.

Как установлено в публикации [18], безразмерный параметр K_W связан с параметрами склона соотношением

$$K_W = 0,9 - 0,4 \frac{L \sin \alpha}{H_{OT}}, \quad (3)$$

что позволяет с помощью коэффициента относительной влажности K_W учитывать влияние параметров склона L , α и H_{OT} на показатель прочности почвогрунта.

На рисунке 1 представлена зависимость R_c от K_W . Анализ гиперболической кривой $R_c(K_W)$ показывает, что при абсциссе $K_W = 0,70—0,75$ наблюдается сопряжение ниспадающей и асимптотической ветвей полученной гиперболы, что означает существование предела насыщения почвогрунта влагой, после которого его прочность снижается слабо.

В механике грунтов отмечают влияние эффекта дилатансии на изменение прочности краевой части массива в процессе его статического нагружения [19]. Поскольку давление на грунт происходит в ограниченном объёме, дилатансия вызывает в массиве рост средних напряжений, что обуславливает увеличение сопротивления сдвигу и повышение несущей способности грунта.

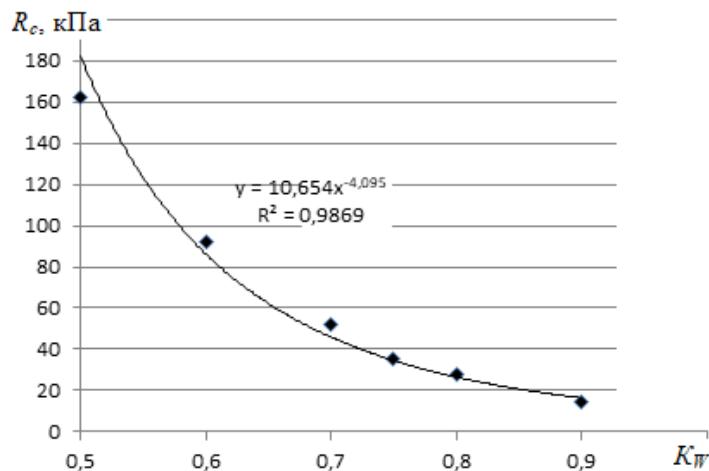


Рисунок 1. Зависимость R_c от K_W

Figure 1. Dependence of R_c on K_W

Угол дилатансии ψ способствует увеличению суммарного угла внутреннего трения φ и для их связи в работе [19] предложена формула

$$\sin \psi = \frac{\sin \varphi - \sin \varphi_{kp}}{1 - \sin \varphi \sin \varphi_{kp}}, \quad (4)$$

где φ_{kp} — значения угла внутреннего трения $\varphi = \varphi_{kp}$, который соответствует остаточному значению сопротивления сдвигу и возникновению плоскости потенциала plasticитности.

Оценить показатель φ_{kp} для суглинка можно с помощью соотношения (2) при $K_W = 1$, т. е. по достижении показателя влажности W значения предела пластичности W_T . Таким образом, для суглинка принимаем $\varphi_{kp} = 8,389^\circ$.

На рисунке 2, основываясь на соотношениях (2)—(4), представлена зависимость угла дилатансии ψ , $^\circ$ от коэффициента K_W .

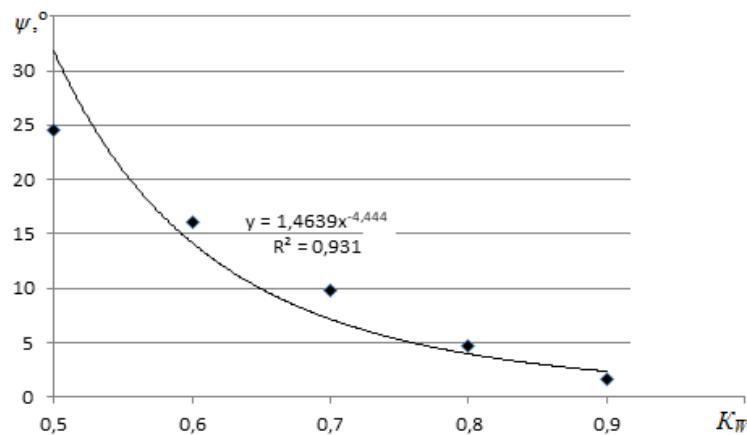


Рисунок 2. Зависимость угла дилатансии ψ от коэффициента K_W

Figure 2. The dependence of the dilatancy angle ψ on the coefficient K_W

Как видим, в диапазоне $K_W < 0,7$ ($W < 28\%$ при $W_T = 40\%$) наблюдается более чем трёхкратное снижение угла ψ , после чего имеет место дальнейшее асимптотическое снижение.

Оценим влияние угла дилатансии на изменение показателя прочности почвогрунта на одноосное сжатие (рисунок 3), на котором отложены: по оси ординат — R_c , кПа, по оси абсцисс — K_W .

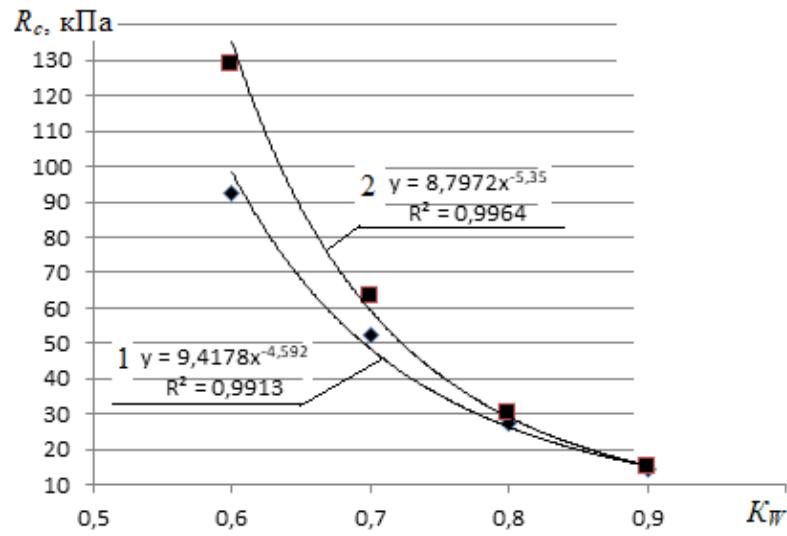


Рисунок 3. Зависимость R_c от K_W : 1 — без учёта угла ψ ; 2 — с учётом угла ψ

Figure 3. Dependence of R_c on K_W : 1 — without taking into account the angle ψ ; 2 — taking into account the angle ψ

Существенное повышение прочности грунта (на 40—45 %) за счёт учёта эффекта дилатансии имеет место в узком диапазоне значений $K_W = 0,60—0,65$, т. е. суглинков

с влажностью $W \approx 25\%$, при большей влажности можно ограничиться только значениями угла внутреннего трения φ .

Обобщая полученные результаты для других видов грунтов, можно заключить, что грунты, у которых имеет место существенное снижение угла внутреннего трения φ с ростом влажности W , учёт угла дилатансии ψ при оценке прочности почвогрунтов умеренной влажности (W не более 25 %) представляется целесообразным.

3. Результаты

Если обратиться к данным рисунка 3 в контексте оценки работоспособности трелёвочного волока (технологического коридора) на склонах оттаивающих почвогрунтов, влажность которых составляет $W > 25\%$ ($K_W \geq 0,63$), видно, что диапазон изменения величины R_c составляет 14—90 кПа. Давление на почвогрунт q , которое оказывают через шины колёсные лесные машины (ЛМ-К), составляет 27—84 кПа. Применение лесных машин с полугусеничным ходом (ЛМ-ПГХ) позволяет снизить величину q до 8—10 кПа. Таким образом, можно заключить, что диапазоны изменения параметров внешнего давления q и прочности почвогрунта R_c практически совпадают. Этот вывод позволяет подойти к проблеме классификация склонов оттаивающих почвогрунтов по геотехническим условиям их взаимодействия с лесной машиной или трелёвочной системой на основе оценки допустимых вариаций параметра R_c .

Применим метод статистических испытаний [20] к вариационному определению параметров μ_i прочности почвогрунта: $\mu_1 = C$, $\mu_2 = \varphi$ и $\mu_3 = R_c$. Обозначим математические ожидания этих параметров соответственно $M(C)$, $M(\varphi)$ и $M(R_c)$. Программа вырабатывает 20 случайных чисел μ_i ($i = 1 \dots 20$), нормально распределённых в интервале (-1, 1) с нулевым математическим ожиданием, которые подставляются в систему формул общего вида:

$$C_i = M(C)*(1 + \eta\mu_i), \varphi_i = M(\varphi)*(1 + \eta\mu_i), R_{ci} = M(R_c)*(1 + \eta\mu_i), \quad (5)$$

где η — коэффициент вариации наиболее изменчивого параметра.

Статистическая обработка выборок значений C_i , φ_i и R_{ci} позволяет определить коэффициенты их вариаций — соответственно η_i .

На рисунке 4 представлены зависимости коэффициентов вариаций параметров прочности суглинка η_i (линии 1, 2, 3 соответственно) от коэффициента вариации η . Линейная зависимость 3, характеризующая изменчивость предела прочности почвогрунта на одноосное сжатие R_c , позволяет, задавшись предельным значением величины $\eta = 30\%$ (третий класс точности инженерных расчётов), получить значение $\eta_3 = 22\%$. Поскольку умножение математического ожидания на коэффициент вариации определяет «одну сигму σ » — среднеквадратическое отклонение, то полный $2\sigma = 44\%$ -й размах одной шкалы изменения R_c приводит к следующей системе классификации (таблица 1): шесть категорий почвогрунтов — от очень крепких до очень слабых, по аналогии с классификацией почвенно-грунтовых условий.

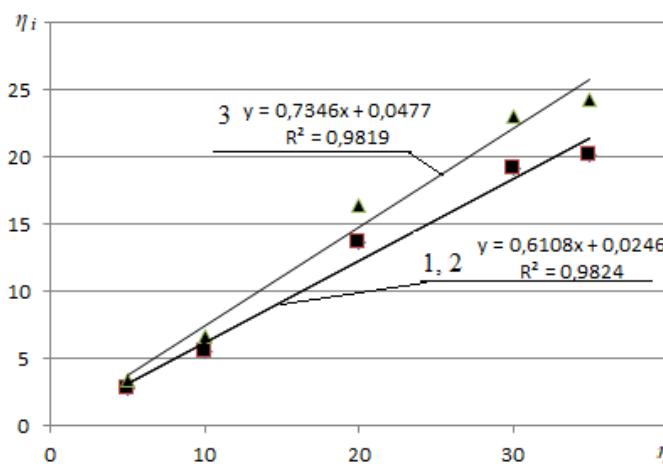


Рисунок 4. Взаимосвязь между коэффициентами вариаций параметров прочности почвогрунта

Figure 4. Relationship between coefficients of variations of soil strength parameters

Таблица 1. Классификация почвогрунтов по их прочности на одноосное сжатие

Table 1. Classification of soils by their uniaxial compressive strength

Категория	Характеристика почвогрунта	Диапазон R_c , кПа
I	Очень крепкий	> 90
II	Крепкий	63—90
III	Средний	43—63
IV	Весьма средний	30—43
V	Слабый	21—30
VI	Очень слабый	< 21

Необходимо отметить, что данные таблицы 1 следует отнести к однократному воздействию нагрузки на почвогрунт. При циклическом взаимодействии шины (или гусеницы) с краевой частью массива механика разрушения учитывает остаточные деформации [21]. Основываясь на соотношении (3) и данных рисунка 1, установлено влияние на показатель прочности R_c , кПа, следующих параметров склона — удаление K_L , %, контакта взаимодействия от основания склона, угла его наклона α , $^\circ$, и мощности H_{OT} , м (рисунок 5).

Обратные функции полученных корреляционных зависимостей представлены на рисунке 6, где по оси абсцисс отложены значения R_c , кПа, а на единой оси ординат — функции: 1 — относительного удаления K_L , %, 2 — угла наклона α , $^\circ$; 3 — мощности оттаивающего слоя H_{OT} , м. Основываясь на данных рисунка 6 и таблицы 1, установлено соответствие параметров склона шкале категорий прочности оттаивающего почвогрунта, что позволяет обосновать классификацию геотехнических условий работ (таблица 2).

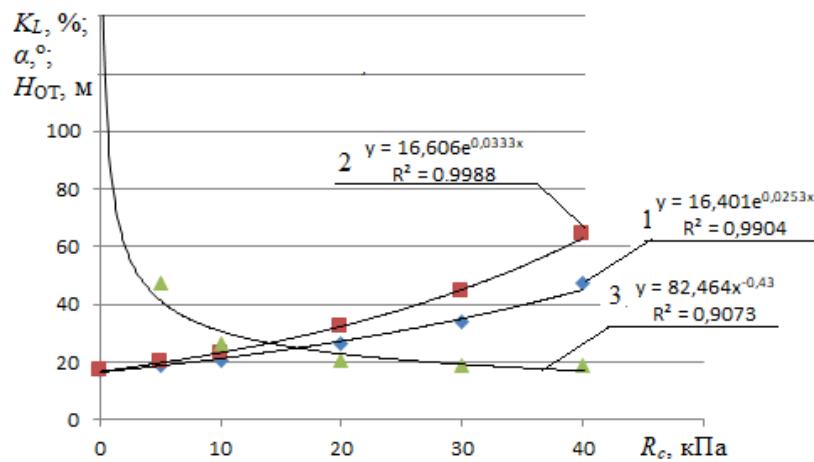


Рисунок 5. Зависимости прочности почвогрунта от параметров склона

Figure 5. Dependences of soil strength on slope parameters

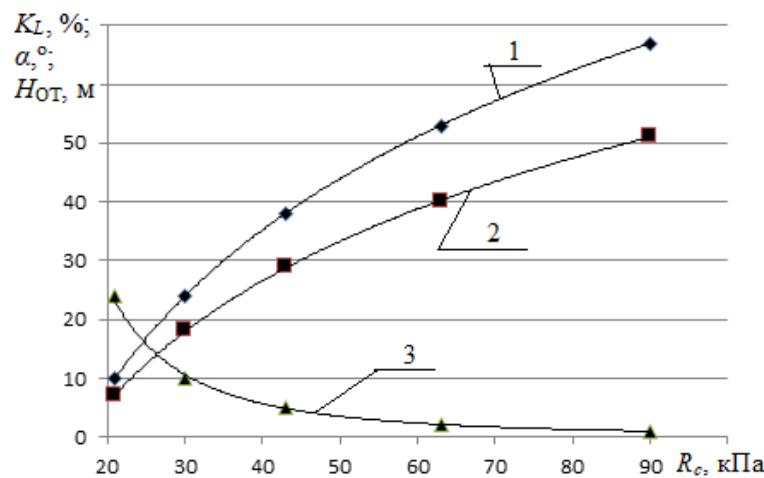


Рисунок 6. Обратные функции зависимостей параметров склона от прочности почвогрунта

Figure 6. Inverse functions of dependence of slope parameters on soil strength

Как следует из анализа данных таблицы 2, сочетание параметров геотехнических условий работы лесных машин, когда лесная машина (трелёвочная система на её базе) удалена от основания склона не более чем на 10 % его общей длины, при этом склон достаточно пологий ($\alpha < 7^\circ$) и трелёвочный волок (технологический коридор) близко расположен к мощному ($H_{0T} > 24 \text{ м}$) слою оттаивающего почвогрунта, равносильно тому, что почвогрунт следует отнести к категории VI, классифицировать его как очень слабый, а сами условия работ также относятся к категории VI — как наиболее сложные.

Таблица 2. Классификация геотехнических условий при работе на склонах оттаивающих почвогрунтов

Table 2. Classification of geotechnical conditions when operating on the slopes with thawing soils

Категория условий	Диапазон параметров склона		
	$K_L, \%$	$\alpha, {}^\circ$	$H_{OT}, \text{м}$
I	> 67	> 51	< 1
II	53—67	40—51	1—2
III	38—53	29—40	2—5
IV	24—38	18—29	5—10
V	10—24	7—18	10—24
VI	< 10	< 7	> 24

И наоборот, удаление машины на величину $K_L > 67\%$ от основания крутого ($\alpha > 51 {}^\circ$) склона, когда трелёвочный волок (технологический коридор) удалён от маломощного ($H_{OT} < 1 \text{ м}$) слоя оттаивающего почвогрунта, следует рассматривать как работу на очень крепких почвогрунтах в наиболее благоприятных условиях I категории сложности.

Геотехнические условия, относящиеся к категории VI, практически исключают возможность применения колёсных лесных машин даже при минимальных значениях давления шин на почвогрунт, равных 27 кПа, которые можно ограничено рекомендовать для условий (почвогрунтов) II категории. В этом случае целесообразно переходить на лесные машины с гусеничным или полугусеничным ходом. Для геотехнических условий I—III категорий, при которых технологическое состояние прочности позволяет отнести почвогрунты к средним и крепким, снимаются какие-либо ограничения на применение колёсных лесных машин с давлением на почвогрунт от 30 до 90 кПа.

4. Обсуждение и заключение

Таким образом, разработанная классификация прочности почвогрунтов и их соответствия геотехническим условиям лесозаготовок на склонах оттаивающих почвогрунтов позволяет оценить работоспособность трелёвочного волока (технологического коридора) и его эффективность при использовании различных лесных машин и трелёвочных систем.

Работа выполнена в рамках деятельности научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование выполнено на средства гранта Российского научного фонда № 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>.

Список литературы

1. Швецова В. В. Современные программные комплексы для повышения эффективности сухопутного транспорта леса // 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. 136—139.
2. Мохирев А. П., Горяева Е. В., Исламова М. Т. Прогнозирование периода эксплуатации сезонных автомобильных дорог зимнего действия // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее: Сб. науч. ст. по материалам Всерос. научно-практич. конф., посвящённой 40-летию создания Инженерно-строительного института. Красноярск, 2022. С. 50—54.
3. Медведев С. О., Мохирев А. П. Отдельные аспекты развития транспортной инфраструктуры в лесной отрасли // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее: Сб. науч. ст. по материалам Всерос. научно-практич. конф., посвящённой 40-летию создания Инженерно-строительного института. Красноярск, 2022. С. 46—49.
4. Лышико А. С., Медведев С. О., Мохирев А. П. Обоснование транспортно-логистических маршрутов на территории Арктики и крайнего севера Красноярского края // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: Сб. материалов Всерос. научно-практич. конф. Красноярск, 2021. С. 79—82.
5. Швецова В. В. Перспективные направления совершенствования организации лесозаготовительного производства // 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. 99—103.
6. Швецова В. В. Графическое представление эффективности комплексов лесных машин // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Седьмой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2021. С. 201—203.
7. Швецова В. В. Оценка экологической безопасности систем машин лесозаготовительного производства // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2020. С. 423.
8. Швецова В. В. Эффективность работы систем машин лесозаготовительного производства // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. № 57. С. 17—21.
9. Швецова В. В. Нестандартные виды первичного транспорта леса // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2021. С. 317—320.
10. Швецова В. В., Вернер Н. Н. Современные тенденции технического развития лесозаготовительного производства в России // Тенденции развития науки и образования. 2018. № 40-2. С. 40—42.
11. Рунова Е. М., Власова С. А. Некоторые особенности компенсационного лесовосстановления в Иркутской области // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. № 58. С. 46—50.
12. Рунова Е. М., Савченкова В. А. Анализ характера лесовосстановления вырубок на примере Усть-Илимского района // Естественные и инженерные науки — развитию регионов: Материалы межрегион. научно-техн. конф. Братск, 2003. С. 196—197.
13. Рунова Е. М., Власова С. А. Исследование лесовосстановительных процессов в Иркутской области в связи с требованиями компенсационного лесовосстановления // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. № 58. С. 43—46.

14. Оценка несущей способности мёрзлого и оттаившего грунта при неполной информации о состоянии его взаимодействия с трелёвочной системой / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 2 (42). С. 80—86.
15. Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Гулько А. Е. Анализ методов расчёта параметров и обоснование математической модели разрушения коры при групповой окорке древесины // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2011. № 8 (121). С. 92—96.
16. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах: Учеб. пособие для вузов. М.: Недра, 1989. 270 с.
17. Калабина М. В., Царапов М. Н. Прочностные свойства оттаивающих грунтов // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки: Материалы Всерос. конф. с междунар. участием. М., 2017. С. 542—546.
18. Исследование процесса образования колеи и её устойчивость при работе лесных машин и трелёвочных систем на склонах массива оттаивающего грунта / В. А. Каляшов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11, № 2 (42). С. 121—132.
19. Мирный А. Ю. Исследования дилатансии в дисперсных грунтах и методы её количественной оценки // Инженерная геология. 2019. Т. 14, № 2. С. 34—43.
20. Вариационный метод расчёта параметров взаимодействия трелёвочной системы с массивом мёрзлых и оттаивающих грунтов / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 1 (41). С. 68—77.
21. Шапиро В. Я. Деформация и циклическое уплотнение почвогрунта между грунтозацепами крупногабаритных лесных шин // Техника и технология. 2006. № 2. С. 94—100.

References

1. Shvetsova V. V. Modern software systems for improving the efficiency of land transport of forests. *Innovations in the chemical and forestry complex: trends and prospects of development. Materials of the All-Russian Scientific and practical conference*. Ed. Yu. A. Bezrukikh, E. V. Melnikova. Krasnoyarsk, 2022, pp. 136—139. (In Russ.)
2. Mohirev A. P., Goryaeva E. V., Islamova M. T. Forecasting the period of operation of seasonal winter roads. *Current issues of construction: a look into the future. Collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian Scientific and Practical conference dedicated to the 40th anniversary of the establishment of the Institute of Civil Engineering*. Krasnoyarsk, 2022, pp. 50—54. (In Russ.)
3. Medvedev S. O., Mohirev A. P. Certain aspects of the development of transport infrastructure in the forest industry. *Actual issues of construction: a look into the future. Collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian Scientific and Practical conference dedicated to the 40th anniversary of the establishment of the Institute of Civil Engineering*. Krasnoyarsk, 2022, pp. 46—49. (In Russ.)
4. Lyshko A. S., Medvedev S. O., Mohirev A. P. Substantiation of transport and logistics routes in the Arctic and the far north of the Krasnoyarsk Territory. *Innovations in the chemical-forestry complex: trends and prospects of development. Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference*. Krasnoyarsk, 2021, pp. 79—82. (In Russ.)
5. Shvetsova V. V. Promising directions for improving the organization of logging production. *Innovations in the chemical and forestry complex: trends and prospects of development*.

Materials of the All-Russian Scientific and practical conference. Ed. Yu. A. Bezrukikh, E. V. Melnikova. Krasnoyarsk, 2022, pp. 99—103. (In Russ.)

6. Shvetsova V. V. Graphical representation of the effectiveness of forest machinery complexes. *Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Seventh All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation.* Petrozavodsk, 2021, pp. 201—203. (In Russ.)
7. Shvetsova V. V. Assessment of ecological safety of logging production machinery systems. *Transport and transport-technological systems. Materials of the International Scientific and Technical Conference.* Ed. N. S. Zakharov. Tyumen, 2020, p. 423. (In Russ.)
8. Shvetsova V. V. Efficiency of work of systems of machines of logging production. *Actual problems of the forest complex*, 2020, no. 57, pp. 17—21. (In Russ.)
9. Shvetsova V. V. Non-standard types of primary forest transport. *Transport and transport-technological systems. Materials of the International Scientific and Technical Conference.* Ed. N. S. Zakharov. Tyumen, 2021, pp. 317—320. (In Russ.)
10. Shvetsova V. V., Werner N. N. Modern trends in the technical development of logging production in Russia. *Trends in the development of science and education*, 2018, no. 40-2, pp. 40—42. (In Russ.)
11. Runova E. M., Vlasova S. A. Some features of compensatory reforestation in the Irkutsk region. *Actual problems of the forest complex*, 2020, no. 58, pp. 46—50. (In Russ.)
12. Runova E. M., Savchenkova V. A. Analysis of the nature of reforestation of cuttings on the example of Ust-Ilimsky district. *Natural and engineering sciences — development of regions. Materials of the interregional scientific and technical conference.* Bratsk, 2003, pp. 196—197. (In Russ.)
13. Runova E. M., Vlasova S. A. Research of reforestation processes in the Irkutsk region in connection with the requirements of compensatory reforestation. *Actual problems of the forest complex*, 2020, no. 58, pp. 43—46. (In Russ.)
14. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Assessment of the bearing capacity of frozen and thawed soil with incomplete information about the state of its interaction with the skidding system. *The system. Methods. Technologies*, 2019, no. 2 (42), pp. 80—86. (In Russ.)
15. Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Gulko A. E. Analysis of methods for calculating parameters and substantiation of a mathematical model of bark destruction during group debarking of wood. *Scientific notes of Petrozavodsk State University*, 2011, no. 8 (121), pp. 92—96. (In Russ.)
16. Bulychev N. S. *Mechanics of underground structures in examples and tasks: A textbook for universities.* Moscow, Nedra, 1989. 270 p. (In Russ.)
17. Kalabina M. V., Tsarapov M. N. Strength properties of thawing soils. In the collection: *Current state, problems and prospects of development of branch science. Materials of the All-Russian conference with international participation.* Moscow, 2017, pp. 542—546. (In Russ.)
18. Kalyashov V. A., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I., Starodubtseva T. N. Investigation of the process of track formation and its stability during the operation of forest machines and skidding systems on the slopes of the thawing soil massif. *Forestry journal*, 2021, vol. 11, no. 2 (42), pp. 121—132. (In Russ.)
19. Mirny A. Yu. Studies of dilatancy in dispersed soils and methods of its quantitative assessment. *Engineering geology*, 2019, vol. 14, no. 2, pp. 34—43. (In Russ.)
20. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Variational method for calculating the parameters of the interaction of a skidding system with an array of frozen and thawing soils. *The system. Methods. Technologies*, 2019, no. 1 (41), pp. 68—77. (In Russ.)

21. Shapiro V. Ya., Grigorev I. V. Deformation and cyclic compaction of the soil between the ground hooks of large-sized forest tires. *Technique and technology*, 2006, no. 2, pp. 94—100.
(In Russ.)

© Каляшов В. А., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Новиков М. С.,
Григорьева О. И., 2023

УДК 630*36

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6703

Обзор

Перспективность дальнейших исследований по совершенствованию гусеничных лесных машин

Карасев Юрий Анатольевич

соискатель, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова (Российская Федерация), kya1105@mail.ru

Марков Виктор Александрович

кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова (Российская Федерация), mactor85@mail.ru

Дмитриев Александр Сергеевич

инженер авторского надзора АО «Гипростроймост-Санкт-Петербург» (Российская Федерация), dmitriev.nauka@mail.ru

Должиков Илья Сергеевич

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

Юдилевич Александр Михайлович

аспирант, Братский государственный университет (Российская Федерация), kafedra388@mail.ru

Получена: 19 января 2023 / Принята: 27 февраля 2023 / Опубликована: 3 марта 2023

Аннотация: В обзоре на основании анализа сложившейся ситуации в отечественной лесной науке и лесном машиностроении показаны перспективы расширения выпуска и использования в лесозаготовительном производстве и лесном хозяйстве гусеничных лесных машин. Проанализированы достоинства и недостатки колесных и гусеничных баз лесных машин как с точки зрения эксплуатационной, так и экологической эффективности их использования, включая условия эксплуатации в лесах на вечной мерзлоте. Показано, что отечественные лесные машины на базе гусеничного шасси имеют очень большие перспективы широкого применения в лесном хозяйстве и в лесозаготовительном производстве. Эти машины, по сравнению с колесными, значительно экологичнее,

значительно дешевле в производстве и эксплуатации. На российских машиностроительных заводах есть большой опыт производства таких машин. За счет значительно более простой конструкции возможно обеспечить использование комплектующих отечественного производства. Обоснована необходимость нормативного регулирования последствий воздействия лесных машин на почвогрунт по следующим показателям: по допустимому давлению на почвогрунт, глубине оставляемой колеи и степени уплотнения почвогрунта.

Ключевые слова: колёсные лесные машины; гусеничные лесные машины; воздействие на почвогрунты

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6703

Review

Prospects for further research on the improvement of tracked forest vehicles

Yuri Karasev

Applicant, St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S. M. Kirov (Russian Federation), kya1105@mail.ru

Victor Markov

Ph. D. in engineering, associate professor, St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S. M. Kirov (Russian Federation), mactor85@mail.ru

Alexander Dmitriev

author supervision engineer of JSC «Giprostroymost-St. Petersburg» (Russian Federation), dmitriev.nauka@mail.ru

Ilya Dolzhikov

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

Alexander Yudilevich

Ph. D. student, Bratsk State University (Russian Federation), kafedra388@mail.ru

Received: 19 January 2023 / Accepted: 27 February 2023 / Published: 3 March 2023

Abstract: The analysis of the current situation in the domestic forestry science and forestry engineering allowed the authors to describe the prospects for expanding the production and use of tracked forest vehicles in logging production and forestry. The advantages and disadvantages of wheeled and tracked forest vehicles are analyzed, both from the point of view of their operational and environmental efficiency, including operating conditions in forests in the permafrost zone. It is shown that domestic forestry machines based on tracked chassis have good prospects for wide application in forestry and in logging production. These machines, compared with the wheeled ones, are much more environmentally friendly, much cheaper to manufacture and operate. Moreover, Russian machine-building plants have extensive experience in the production of such machines. A simpler design of tracked machines ensures 100% manufacture of components within our country. The authors claim the necessity of regulatory control of the ecological environmental impact of forest machines operation, in particular,

permissible pressure on the soil, the depth of the track left, the degree of soil compaction.

Keywords: wheeled forestry machines; tracked forestry machines; impact on soils

1. Введение

Основной целью данной работы является обоснование перспективности развития исследований в области совершенствования гусеничных лесных машин в рамках научной специальности 4.3.4 «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины». Необходимость данного обоснования связана с некоторыми обстоятельствами. Во-первых, в названии данной научной специальности отсутствует прямое упоминание о лесозаготовительном производстве. Во-вторых, в результате практически полного уничтожения отечественного лесного машиностроения, традиционно базировавшегося на гусеничных тракторах, российские лесозаготовители перешли на импортные колёсные лесные машины, производящиеся в недружественных странах. За пару десятков лет доминирования в российском лесозаготовительном производстве импортных колёсных тракторов успело сформироваться мнение о не перспективности гусеничных лесных машин. С началом санкционной войны ребром встал вопрос о необходимости срочного возрождения отечественного лесного машиностроения. В этой связи авторы статьи сочли целесообразным и своевременным представить данный сравнительный анализ колёсных и гусеничных лесных машин, показывающий, что гусеничная база для лесных машин имеет свои существенные преимущества и списывать её со счетов при планировании развития лесных машин в России нельзя.

До октября 2022 г. в Российской Федерации действовали три лесотехнические специальности — 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства»; 05.21.03 «Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины»; 05.21.05 «Древесиноведение, технология и оборудование деревопереработки».

С октября 2022 г., согласно приказу Министерства науки и высшего образования РФ от 24.02.2021 № 118 «Об утверждении номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются учёные степени и внесении изменения в Положение о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук, утверждённое приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 10 ноября 2017 г. № 1093», они объединены в одну научную специальность 4.3.4 «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины».

Как видно, из названия специальности 4.3.4 «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины» выбыл термин «лесозаготовки». В принципе, если ориентироваться на европейскую практику, это нормально, поскольку в Европе лесозаготовки и лесное хозяйство объединены единым термином «Forestry» [1].

Согласно действующему Лесному кодексу Российской Федерации, лесопользователи, заготавливающие древесину по договорам аренды участков лесного фонда (которые заключаются на срок от 10 до 49 лет), обязаны проводить также лесовосстановительные работы, работы по уходу за лесами, а также работы, связанные с охраной и защитой леса,

включая противопожарные мероприятия. То есть такие лесопользователи проводят полный комплекс лесозаготовительных и лесохозяйственных работ, который и подразумевает термин «Forestry» [2]. Иначе говоря, современное лесозаготовительное производство в нашей стране, включающее четыре основных этапа — лесосечные работы, транспорт леса, лесоскладские работы, лесовосстановительные работы, является несколько расширенным термином «Forestry», поскольку лесоскладские работы являются переходным этапом между лесозаготовкой и деревопереработкой [3].

Достаточно распространённым видом пользования лесом в Российской Федерации, особенно в Сибири и на Дальнем Востоке, является разрубка линейных объектов под линии электропередач, различные трубопроводы [4]. Согласно Федеральному закону «О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования воспроизводства лесов и лесоразведения» от 19.07.2018 № 212-ФЗ, такие лесопользователи обязаны проводить работы по лесовосстановлению (лесоразведению) на участках лесного фонда (не находящихся в аренде) на такой же площади, что и выведена под линейный объект, в пределах субъекта Российской Федерации, на территории которого находится этот объект. То есть при строительстве линейных объектов на землях лесного фонда также выполняются лесосечные и лесовосстановительные работы [5].

Вышесказанное позволяет утверждать, что технологические процессы, машины и оборудование рубок лесных насаждений в полной мере относятся к понятию «лесное хозяйство», указанному в названии научной специальности 4.3.4 «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины».

Также целесообразно обратить внимание на следующие моменты:

- Во-первых, достаточно часто для выполнения лесосечных, лесовосстановительных и других лесохозяйственных работ на лесопромышленных предприятиях задействуются одни и те же машины [6—10]. Исходя из принципа модульности построения систем машин, энергетические и транспортные модули могут использоваться на различных операциях [11], [12]. И таких примеров можно привести достаточно много — противопожарный форвардер, представляющий собой форвардер, временно оснащённый ёмкостью для воды, системами её набора и распыления на месте пожара [13]; подборщики порубочных остатков — трелёвочные тракторы, оснащённые грабельным собирающим устройством или кузовом для сбора и вывозки порубочных остатков; машины для подготовки почвы на вырубках и гарях — трелёвочные тракторы, оснащённые плугом или почвенными фрезами; мульчеры; ротораторы и т. д. [14—16]. Такому разноплановому использованию базовых лесных машин во многом способствует сезонность проведения рубок леса, лесовосстановительных и других лесохозяйственных работ [17—19]. Ведь, по очевидным причинам, лесовосстановительные и многие другие (хотя и не все) лесохозяйственные работы проводятся в тёплый период года, а рубки леса, особенно в лесных массивах со сложными почвенно-грунтовыми условиями, предпочтительно проводить в зимний период, когда почвогрунты замёрзнут [20], [21].

- Во-вторых, в связи с постепенной деградацией российской глубинки (оттоком работоспособного населения (особенно молодёжи) в крупные города, а также резким снижением притока в отрасль сезонных работников из стран ближнего зарубежья) в лесозаготовительном производстве и лесном хозяйстве Российской Федерации отмечается все меньше доли ручного труда и всё больший объём работ выполняется различными машинными комплексами на базе специальных колёсных и гусеничных тракторов, которые принято называть общим термином «лесные машины» [22—24].

В этой связи необходимо уточнить терминологический аппарат, используемый в дальнейшем. Согласно публикациям [25], [26], лесными машинами называются любые специальные тракторы, конструктивно предназначенные для работы в сложных условиях лесного фонда. Прежде всего, ряд таких машин, особенно для лесосечных работ, должны быть оснащены специальными конструкциями, обеспечивающими безопасность оператора [27], [28]. Это, например, специальные стёкла на лесозаготовительных машинах (харвестерах и т. д.), защищающие оператора от отстрела пильной цепи, конструктивные укрепления кабины, которые защищают оператора при перевороте машины или падении на кабину ствола дерева — ROPS (roll-over protective structure), и т. д. [29], [30]. Пригодность машины для работы в лесу часто подтверждается специальными сертификатами безопасности [31]. Конечно, нельзя не признать, что на лесосечных работах в нашей стране, особенно на предприятиях, проводящих малообъёмные лесозаготовки, часто встречаются и обычные сельскохозяйственные тракторы (чаще всего МТЗ), обычно на трелёвке, иногда погрузке, оснащённые специальным технологическим оборудованием [32]. Но такой вариант нельзя признать удовлетворительной практикой, поскольку во главу угла в любой производственной сфере должны ставиться жизнь и здоровье персонала, а лесозаготовительная отрасль отнюдь не является безопасной, согласно статистике несчастных случаев [33—35].

Среди лесных машин выделяют класс лесозаготовительных машин [36]. К ним относят лесные машины, конструктивно предназначенные для валки деревьев и, как правило, выполнения ряда последующих операций: валочные машины (ВМ), валочно-пакетирующие машины (ВПМ), валочно-трелёвочные машины (ВТМ), валочно-сучкорезные машины (ВСМ), валочно-сучкорезно-раскряжёвочные машины (ВСРМ, или харвестеры), валочно-сучкорезно-раскряжёвочно-трелёвочные машины (ВСРТМ, или харвардеры и форвестеры), валочно-трелёвочно-процессорные машины (ВТПМ) [37—40], т. е. к лесозаготовительным машинам относят такие лесные машины, которые, прежде всего, могут валить деревья. Такое выделение связано, во-первых, с тем, что операция валки деревьев является первой во всех технологических процессах лесосечных работ. Во-вторых, с тем, что, в подавляющем большинстве случаев, это машины узкоспециализированные, которые не задействуют на других операциях лесосечных, лесовосстановительных или других лесохозяйственных работ. В виде исключения можно отметить форвестер, который может быть временно переоснащён в лесопожарный форвардер, или машину для подготовки

почвы на вырубках и гарях, или манипуляторную машину для сбора порубочных остатков, а также широкозахватную ВПМ, или гусеничный харвестер (на базе экскаватора), которые возможно переоснастить в полноповоротный погрузчик, или в посадочную машину для сеянцев (саженцев) с закрытой корневой системой [41].

Кроме лесозаготовительных, к наиболее узкоспециализированным лесным машинам можно отнести погрузчики и процессоры (сучкорезно-раскряжёвочные машины, используемые при канадском варианте сортиментной технологии лесосечных работ) [42]. Наиболее универсальными по применению являются трелёвочные машины [43].

2. Материалы и методы

В настоящее время в лесозаготовительном производстве Российской Федерации преобладают импортные лесные машины, причём, в основном, произведённые в недружественных странах. Многократные предупреждения учёных и специалистов лесной отрасли о большой опасности такой ситуации не привели к удовлетворительным результатам в области отечественного лесного машиностроения, которое так и осталось в практически полностью разгромленном состоянии к началу специальной военной операции и последовавшей за ней санкционной войне, объявленной нашей стране недружественными странами. Причём основными производителями широко используемых в нашей стране лесных машин были Финляндия, Швеция, Австрия, США, Япония, т. е. страны, объявившие России санкции. Пятый пакет этих санкций напрямую затронул лесную отрасль, как лесозаготовки с лесным хозяйством, так и деревоперерабатывающие предприятия. Это привело к значительным проблемам в области закупки новых машин, обеспечения их оригинальными запасными частями и расходными материалами. Широко используемый для решения возникшей проблемы параллельный импорт через дружественные страны удлиняет и удорожает логистику их доставки, а значит, и конечную себестоимость выполняемых этими машинами работ.

Про гибель российского лесного машиностроения и его последствия сказано и написано достаточно много. Останавливаться на этом вопросе сейчас не имеет смысла. В современной ситуации необходимо искать наиболее оптимальные выходы по цене — срокам — качеству. В связи со сложившимися реалиями предлагается применять термин «перспективные лесные машины», поскольку, по очевидным причинам, наиболее распространённые сейчас импортные лесные машины из недружественных стран не могут считаться также и перспективными, со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Также отметим, что любая лесная машина представляет собой базовое шасси, агрегатированное тем или иным технологическим оборудованием для выполнения различных технологических операций [44].

Как было отмечено ранее, лесные машины можно подразделить по универсальности их применения на операциях лесосечных, лесовосстановительных или других лесохозяйственных работ на узкоспециализированные и универсальные. Но это достаточно

условное деление. В научной литературе принято подразделять лесные машины по следующим признакам:

- *По виду движителя.* По этому конструктивному признаку, традиционно, лесные машины подразделяются на гусеничные и колёсные. Но помимо этих двух, классических, вариантов известны также шагающие машины (фото 1), разработанные финской компанией Timberjack (до её продажи американской компании John Deere). Эти машины были выпущены малой опытной партией (всего 7 шт.) и в широкую серию так и не пошли, вероятно, в связи со сменой собственников бизнеса. Кроме того, есть широко распространённый в практике лесозаготовителей вариант оснащения колёсных лесных машин колёсными гусеницами различных конструкций (рисунок 1) для повышения проходимости (при таком варианте машины часто называют колёсно-гусеничными) [45—50], а также менее распространённый, но встречаемый на практике вариант частичного использования гусеничного хода, частично колёсного — полугусеничные машины (фото 2).

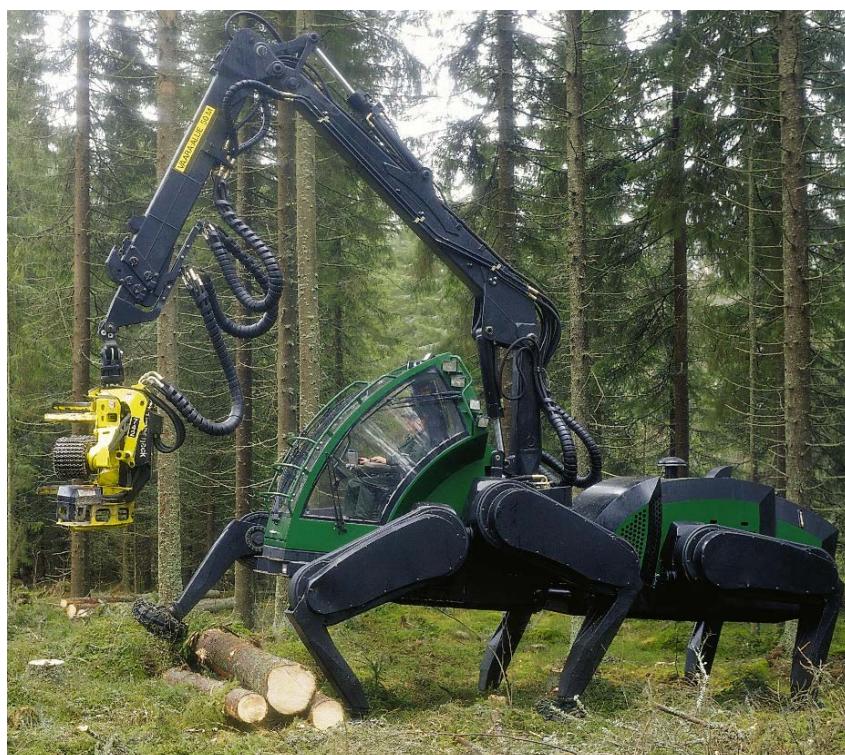


Фото 1. Харвестер с шагающим движителем компании Timberjack

Photo 1. Harvester with walking propeller, Timberjack company

Отметим, что колёсные гусеницы выпускаются не только зарубежными странами. Есть достаточно неплохие примеры аналогичной отечественной продукции, произведённой на основе собственных результатов интеллектуальной деятельности (например, компания «Timbertrack & ПКФ Форвардер»).

Также отметим, что вариант полугусеничного хода, представленный на фото 2, свойствен для лесозаготовительных предприятий, производящих малообъёмные лесозаготовки [51], [52]. Но таких предприятий, имеющих в ОКВЭД раздел «Заготовка древесины», в России большинство (различные ИП и т. д.).

Вид колёсных гусениц	Предназначение
	Колёсные гусеницы Baltic предназначены для мягких почвогрунтов. Защищают почву от повреждений.
	Колёсные гусеницы Combi-track для проходимости в труднодоступной местности. Обеспечивают хорошую сцепляемость с вязким и мягким почвогрунтом.
	Колёсные гусеницы OF предназначены для крутых, скалистых местностей. Обладают повышенной способностью к очистке.
	Колёсные гусеницы ECO-Track один из самых универсальных типов гусениц. Подходят для большинства типов машин и имеют хорошее сцепление с почвогрунтом.
	ECO-Wheel обладают широкой площадью контакта, обеспечивают хорошее сцепление, улучшают устойчивость машины и увеличивают проходимость, а также защищают резину от боковых порезов.

Рисунок 1. Колёсные гусеницы компании Olofsfors

Figure 1. Olofsfors wheeled tracks

Споры между сторонниками колёсных и гусеничных движителей для лесных машин ведутся с середины XX в. [53]. Для отечественного лесного машиностроения традиционна гусеничная модель, начиная с первого в мире специализированного трелёвочного трактора КТ-12.



Фото 2. Форвардер на полугусеничном ходу

Photo 2. Forwarder on a half-track

Онежский и Алтайский тракторные заводы — флагманские машиностроительные предприятия лесной отрасли СССР — выпускали именно гусеничные машины, известные под марками ТТ, ТДТ, ЛХТ, «Онежец». В определённой степени это было связано с тем, что на момент разработки их концептов колёсное тракторостроение в нашей стране было ещё достаточно слабо развито. Сейчас эти заводы не существуют. Как было отмечено выше, в российских лесах доминируют колёсные импортные тракторы. Но это отнюдь не значит, что эпоха гусеничных лесных машин в нашей стране прошла. Наоборот, можно сказать, что у неё наступает ренессанс. Тенденции развития лесного машиностроения в Российской Федерации будут рассмотрены ниже.

■ *По виду выполняемых технологических операций.* В предыдущем разделе работы уже были отмечены различные виды лесозаготовительных машин (ВМ, ВТМ, ВПМ и др.), а также погрузчики, процессоры, трелёвочные тракторы, мульчеры, ротораторы, лесопосадочные машины, подборщики порубочных остатков, машины для подготовки почвы на вырубках и гарях, лесопожарные тракторы [54]. В принципе, это весь основной набор лесных машин, которые, подчеркнём ещё раз, могут быть узкоспециализированными или компоноваться по модульному принципу. Причём это касается даже машин одного и того же назначения. Например, на фото 3 представлен узкоспециализированный гусеничный лесопожарный трактор ТЛП-4М-031 производства ООО «Сибирь-Техника» (РФ), а на фото 4 — лесопожарный колёсный форвардер производства компании Ponsse (Финляндия) [41].



Фото 3. Гусеничный лесопожарный трактор ТЛП-4М-031

Photo. 3. Tracked forest fire tractor TLP-4M-031

ТЛП-4М-031 больше конструктивно приспособлен для борьбы с лесными пожарами, но в непожароопасный период просто занимает место в гараже и «связывает» оборотные средства предприятия. Колёсный лесопожарный форвардер не может прокладывать минерализованные полосы, имеет несколько худшую проходимость в заболоченной и переувлажнённой местности, зато в непожароопасный период, после демонтажа пожарного оборудования, может быть задействован на лесосечных работах по скандинавскому варианту сортиментной технологии заготовки древесины.



Фото 4. Лесопожарный колёсный форвардер

Photo 4. Forest fire wheel forwarder

- *По направлению зоны обслуживания относительно хода машины.* Первоначально этот классификационный признак применяли к лесозаготовительным машинам, однако с развитием лесной техники, увеличением количества и видов машин, агрегатируемых

по модульному принципу, это признак классификации стали применять ко всем лесным машинам [55]. По данному признаку лесные машины подразделяются на: фронтальные — имеют технологическое оборудование, работающее с предметом труда перед машиной или за кормой машины (фото 5); фланговые — имеют технологическое оборудование, работающее с предметом труда с одного или двух бортов машины (фото 6); поворотные (полноповоротные) — имеют технологическое оборудование, работающее с предметом труда с флангов и спереди машины, иногда и за кормой машины (фото 7). Отметим, что многие полноповоротные лесные машины агрегатируются на базе гусеничных экскаваторов [44].



Лесопосадочная машина



Мульчер

Фото 5. Фронтальные лесные машины

Photo 5. Push-type forest machines



БТМ — ВМ 4А



ВМ — ВМ-55

Фото 6. Фланговые лесные машины

Photo 6. Flanking forest machines

■ По ширине обрабатываемой ленты леса. Как и предыдущий, этот классификационный признак изначально был присущ лесозаготовительным машинам, но впоследствии стал использоваться в специальной литературе применительно к другим лесным машинам. Согласно терминам и определениям лесозаготовительного производства, лента — часть пасеки, обрабатываемая вальщиком или лесозаготовительной машиной за один проход [56]. Если технологическое оборудование крепится к корпусу лесной машины, то она будет вынуждена подъезжать отдельно к каждому предмету труда (месту выполнения дискретной операции). Тогда обрабатываемая лента будет узкой, и такие машины принято называть узкозахватными. Если технологическое оборудование у машины крепится к гидроманипулятору, позволяющему за счёт своего вылета существенно увеличивать площадь, обрабатываемую машиной с одной технологической стоянки, то лента получается широкой, и такие машины принято называть широкозахватными. То есть внешним признаком узкозахватных и широкозахватных машин является наличие или отсутствие гидроманипулятора. На фото 5 и 6 представлены узкозахватные лесные машины, а на фото 7 — широкозахватные.



Полноповоротная ВПМ



Мульчер

Фото 7. Полноповоротные лесные машины**Photo 7.** Four-wheel drive forest machines

■ По принадлежности к виду работ (к группе технологических процессов). В современной ситуации это достаточно условное деление, поскольку, как было показано выше, некоторые машины для лесосечных работ вполне могут быть, без больших трудозатрат, переоборудованы в машины для лесовосстановительных и других лесохозяйственных работ. Некоторые машины не могут быть переоборудованы под другие операции (см. фото 3 и 4). В этой связи, на наш взгляд, более целесообразно подразделять по принципу узкоспециализированные машины для лесосечных работ (например,

процессоры), узкоспециализированные машины для лесохозяйственных работ (например, гусеничные лесопожарные тракторы), а также универсальные машины [57].

Деление машин для лесосечных работ по группам технологических процессов (на хлыстовые и сортиментные) также в определённой мере условно. Если харвестеры, харвардеры и форвестеры — это машины только для сортиментной заготовки по скандинавскому варианту, то ВПМ, ВТМ, ВТПМ вполне могут быть задействованы как в хлыстовой заготовке, так и в сортиментной (по канадскому варианту). То же можно сказать и о трелёвочных тракторах: форвардеры (сортиментоподборщики) — для сортиментной скандинавской заготовки; чокерные, бесчокерные, с пачковым захватом (скиддеры) — для хлыстовой или сортиментной заготовки (по канадскому варианту сортиментной технологии заготовки древесины).

Погрузчики являются более специализированной техникой, замыкающей технологические процессы лесосечных работ: перекидные — только для хлыстовой заготовки; манипуляторные (полноповоротные) — могут использоваться и при хлыстовой, и при сортиментной заготовке, но при хлыстовой заготовке на них устанавливаются специальные захваты, а при погрузке сортиментов — обычные грейферные.

В полной мере деление лесных машин на узкоспециализированные и универсальные относится и к проведению лесовосстановительных и других лесохозяйственных работ [58].

3. Результаты

Как было отмечено выше, споры между сторонниками колёсных и гусеничных движителей для лесных машин продолжаются уже достаточно давно. Очевидно, что у любого технического решения есть свои достоинства и свои недостатки. Отечественные лесопромышленные и лесохозяйственные тракторы были, в основном, гусеничными. Базовые шасси для них выпускались на Алтайском тракторном (г. Рубцовск, Алтайский край) и Онежском тракторном (г. Петрозаводск, Республика Карелия) заводах. Несмотря на разницу в двигателях, трансмиссиях, кабинах, тракторы этих заводов (ТТ, ТДТ, ЛХТ, «Онежец») служили базой для самых разных лесных машин: погрузчиков (ПЛ-1Г и ЛТ-65 Б), сучкорезных (ЛП-30 Г и ЛП-33), чокерных трелёвочных (ТДТ-55 А и ТТ-4 М), бесчокерных трелёвочных (ТБ-1 М и ЛП-18), трелёвочных с пачковым захватом (ЛТ-230 и ЛТ-187), ВТМ (ЛП-17 и ЛП-49) и т. д. С точки зрения их эффективной эксплуатации была одна принципиальная рекомендация — машины на базе тракторов Алтайского тракторного (ТТ) завода рекомендовалось использовать в насаждениях со средним объёмом хлыста более $0,4 \text{ м}^3$, а машины на базе тракторов Онежского тракторного (ТДТ, «Онежец») завода рекомендовалось использовать в насаждениях со средним объёмом хлыста до $0,4 \text{ м}^3$.

В конце своего существования Онежский тракторный завод разработал и подготовил к серийному выпуску серию колёсных лесных тракторов под маркой ТЛК [48], но в широкую серию они так и не пошли. Были попытки мелкосерийного выпуска колёсных лесных машин (ЛТ-154) на базе мощных тракторов Кировского тракторного завода (г. Санкт-Петербург).

НПО «Сила» в Латвийской ССР была разработана серия лёгких колёсных лесохозяйственных тракторов на базе машин Липецкого тракторного заводов.

С тех пор прошло уже достаточно много лет. Онежский, Алтайский, Липецкий тракторные заводы не существуют, но ходовые части специальных гусеничных лесных тракторов до сих пор визуально узнаваемы по использованию технического решения, предложенного создателями уже упомянутого первого в мире специального трелёвочного трактора КТ-12, — по высоко поднятому переднему катку и задней ведущей звёздочке гусениц. Благодаря такому решению лесные гусеничные тракторы легко преодолевают специфические препятствия на лесосеке (кочки, пни, поваленные стволы, камни), не встречающиеся на сельхозугодьях или строительных площадках. Неудачный опыт эксплуатации машин Ковровского машиностроительного завода линейки МЛ показал, что гусеничный двигатель обычной строительной машины плохо справляется с лесными препятствиями. На фото 8 хорошо видно различие ходовой части лесного и строительного тракторов.



Фото 8. Визуальное сравнение ходовой части лесного и строительного тракторов

Photo 8. Visual comparison of the chassis of forestry and construction tractors

Первостепенным достоинством гусеничного двигателя перед колёсным трактором всегда называют проходимость. При равном весе машин у гусеничного двигателя значительно больше площадь пятна контакта с поверхностью движения лесосеки и соответственно меньше давление и больше сила тяги при равных мощностях двигателей и КПД трансмиссии [59—65].

Благодаря низкому давлению на почвогрунты лесосек гусеничные лесные машины, при прочих равных условиях, показывают лучшую экологическую совместимость с лесной средой [49]. Исходя из того, что более чем на половине земель лесного фонда Российской Федерации преобладают почвогрунты III и IV категорий, т. е. со слабой несущей способностью, а также исходя из постепенного, но отчётливо видного потепления климата (с 1980 по 2020 г. период устойчивой зимней вывозки древесины с лесосек сократился на три недели [66]), гусеничные лесные машины достаточно часто более предпочтительны, нежели колёсные.

Исходя из сказанного выше (согласно действующему лесному законодательству, лесопользователи обязаны заниматься вопросами лесовосстановления) себестоимость восстановительных работ входит в общую стоимость продукции лесозаготовительного производства, а более средоточдающее воздействие гусеничных лесных машин по сравнению с колёсными (при прочих равных условиях) способствует повышению не только экологической, но и экономической эффективности заготовки и восстановления лесных ресурсов [67], [68].

Безусловно, при плохих почвенно-грунтовых условиях, при глубоком снеге колёсные лесные машины можно оснастить упомянутыми выше колёсными гусеницами, но их приобретение требует дополнительных (и не малых) финансовых затрат. Причём, как показано на рисунке 1, для различных условий эксплуатации, на каждую колёсную лесную машину требуется приобретение нескольких различных комплектов таких колёсных гусениц. На начало 2023 г. средняя стоимость комплекта гусениц на колёсную лесную машину 8к8 составляет 2 млн 520 тыс. руб., т. е. если на одну колёсную лесную машину потребуется приобрести минимально разумный комплект из болотоходных и снегоходных гусениц [69], то затраты составят более 5 млн руб. Без колёсных гусениц тяжёлые колёсные лесные машины наносят ощутимый вред лесной среде, заключающийся в переуплотнении почвы, которое приводит к снижению её аэрации, ухудшению гидрологического режима, а также колеобразованию, что в дальнейшем зачастую служит очагом развития водной, а иногда и ветровой эрозии [70—75].

На фото 9 показана глубокая колея, оставленная колёсной лесной машиной за один проход. Если учитывать, что наиболее нагруженными (с самым большим весом) являются трелёвочные системы и что для трелёвки заготовленных на пасеке лесоматериалов приходится сделать по одному волоку не один десяток рейсов, то становится очевидным, что поле работы колёсной лесной машины в таких условиях лесной среде будет нанесён практически невосполнимый ущерб. Причём этот ущерб будет пролонгирован на очень длительный срок. Помимо снижения экологических функций лесного насаждения на долгие годы, будут существенно увеличены сроки лесовосстановления и снижено его качество, как по приросту, так и по товарной ценности следующей сукцессии насаждения [76—78].

Судя по результатам целенаправленного информационного поиска, ведущие позиции в вопросах экологической и эксплуатационной эффективности лесных машин сейчас занимает научная школа «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства», базирующаяся в настоящее время в Арктическом государственном агротехнологическом университете (г. Якутск). Многочисленные научные публикации участников данной научной школы позволяют сделать однозначный вывод о том, что без использования дополнительных технических средств и/или технологических решений у гусеничного движителя (при прочих равных условиях) экологическая совместимость заметно выше, по сравнению с колёсным [79—81].



Фото 9. Глубокая колея, оставленная колёсной лесной машиной за один проход (Ленинградская обл., Выборгский р-н, 2022 г.)

Photo 9. A deep track left by a wheeled forest machine in one pass (Leningrad region Vyborgsky district, 2022)

Обратим внимание на то, что корневая система деревьев состоит из двух основных типов корней: якорных, которые обеспечивают крепление дерева в почвогрунте, как консольной балки; сосущих, обеспечивающих питание дерева растворёнными в воде минеральными веществами из почвогрунта. При проведении выборочных рубок леса повреждение или угнетение (за счёт переуплотнения окружающего почвогрунта) сосущих корней крайне негативно сказывается на последующем росте оставляемых на добрачивание деревьев, подроста и молодняка. При этом сосущие корни, в основном, располагаются в верхнем почвенном слое почвогрунта [82], [83], толщина которого в boreальных лесах, особенно в лесах, расположенных на вечной мерзлоте, крайне невелика [84], [85]. На рисунках 2—7 представлены эпюры нагрузок и зависимости динамики колеообразования колёсных и гусеничных лесных машин, из которых наглядно видно подтверждение факта большей экологической совместимости гусеничных движителей с лесной средой [86—90].

Также отметим, что в Лесоводственных требованиях к технологическим процессам лесосечных работ, утверждённых Приказом Федеральной службы лесного хозяйства России от 29.11.1993 № 314, было регламентировано: «В целях предотвращения развития эрозионных процессов, ухудшения водно-физических свойств почвы и её плодородия <...>

необходимо использовать на лесосечных работах машины с давлением в рабочем режиме не более 70 кПа для гусеничных и 150 кПа для колёсных движителей». К сожалению, в действующих Правилах 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 № 993, нет никакой конкретики ни по допускаемому давлению движителей лесных машин на почвогрунты, ни, что было бы более рациональным, по допускаемой глубине колеи.

Следует также иметь в виду, что уплотнение почвогрунта происходит не только непосредственно под движителем, но и на определённом расстоянии вбок от трелёвочного волока или технологического коридора [91—93].

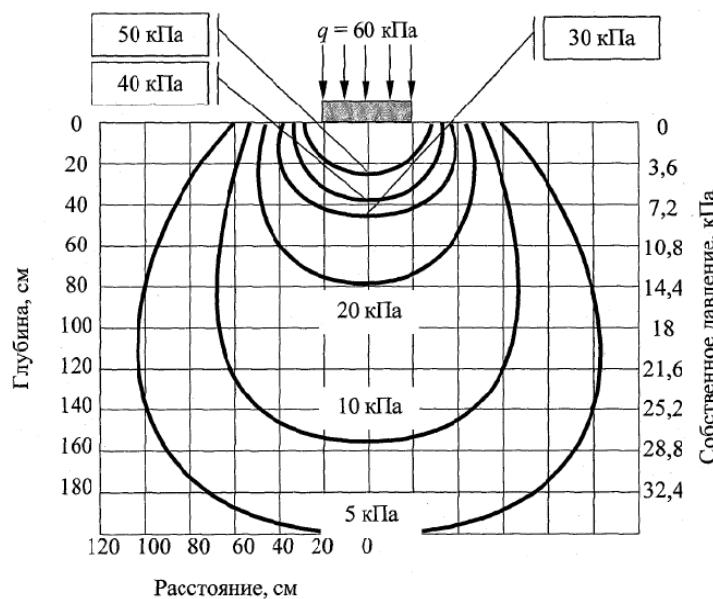


Рисунок 2. Эпюра дополнительных напряжений в идеальном почвогрунте и его собственное давление при плотности $1,8 \text{ г}/\text{см}^3$

Figure 2. Diagram of additional stresses in an ideal soil and its own pressure at a density of $1,8 \text{ g}/\text{cm}^3$

Как показано на рисунке 6, динамика колеообразования может быть разной [94—96]. На прочных почвогрунтах за первые проходы движитель проминает верхний слой почвогрунта, после чего колея практически не увеличивается, динамика похожа на логарифмический закон (вариант 1, рисунок 6). В варианте 2 (рисунок 6) закон изменения динамики колеи, в принципе, тот же, только глубина проминаемого верхнего слоя почвогрунта больше. На слабых почвогрунтах (вариант 3, рисунок 6) процесс колеообразования не стабилизируется, глубина колеи постоянно растёт, пока ездовая возможность волока не будет исчерпана, т. е. глубина колеи сравняется клиренсом лесной

машины. Интенсивность такого процесса может быть разной, что показывает разница между кривыми 3 и 4 на рисунке 6. При многократных проходах и большом давлении на почвогрунт, что характерно для колёсных машин, несущая способность прочного подстилающего слоя почвогрунта в определённый момент оказывается исчерпанной, после чего идёт резкий рост глубины колеи (вариант 5, рисунок 6), и машина может начать «тонуть» (фото 10).

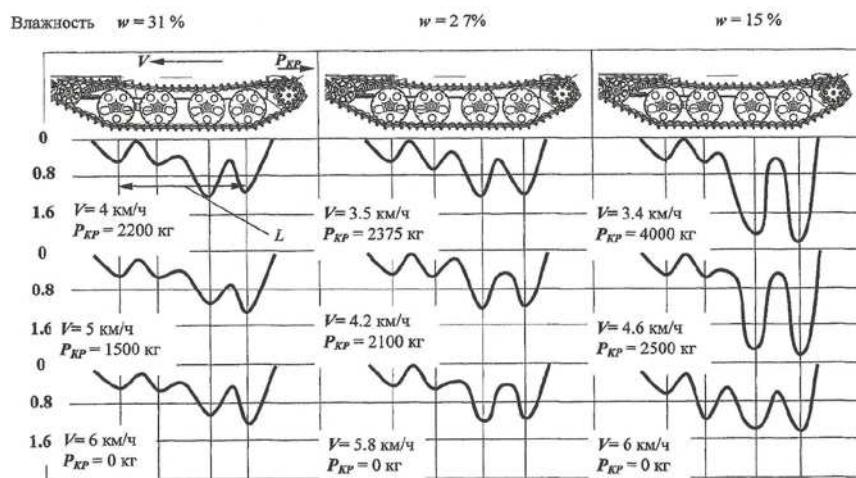


Рисунок 3. Распределение давления на почвогрунт (МПа) по длине опорной поверхности в зависимости от влажности, скорости движения и тягового усилия гусеничного трактора

Figure 3. Distribution of pressure on the soil (MPa) along the length of the support surface depending on humidity, speed and traction of the crawler tractor

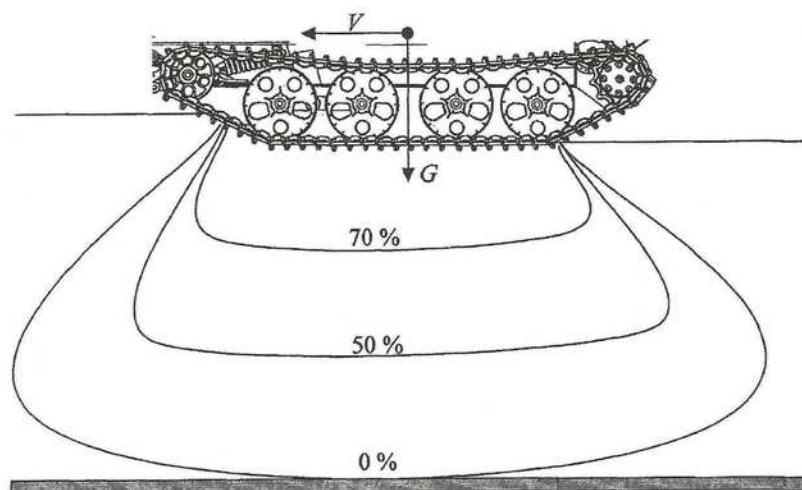


Рисунок 4. Эпюра напряжений в почвогрунте под гусеницами

Figure 4. Stress diagram of stresses in the soil under the tracks

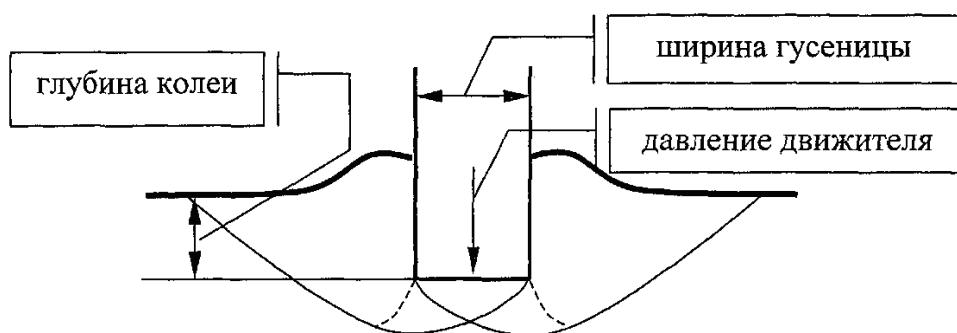


Рисунок 5. Схема колеообразования под воздействием движителя

Figure 5. The scheme of track formation under the mover impact

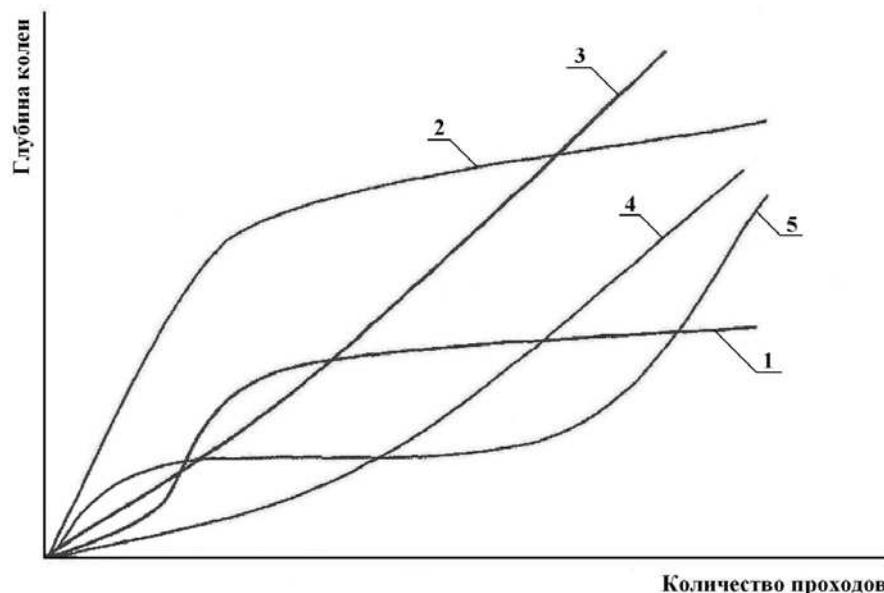


Рисунок 6. Типовые варианты динамики колеообразования: **1** — изменение колеообразования по логарифмическому закону; **2** — изменение колеообразования по логарифмическому закону с ускоренным проминанием колеи; **3** — нестабилизирующийся рост глубины колеи; **4** — нестабилизирующийся рост глубины колеи небольшой интенсивности; **5** — изменение колеообразования по логарифмическому закону с последующим резким ростом

Figure 6. Typical variants of the dynamics of track formation: **1** — change of track formation according to the logarithmic law; **2** — change of track formation according to the logarithmic law with accelerated track penetration; **3** — unstable growth of track depth; **4** — unstable growth of track depth of low intensity; **5** — change of track formation according to the logarithmic law followed by a sharp increase

Как видно из рисунка 7, тяжёлый колёсный лесопромышленный трактор ЛТ-154 значительно интенсивнее образует колею (в равных условиях эксплуатации), нежели гусеничные тракторы.

Представленный на фото 10 производственный случай — далеко не редкость при эксплуатации колёсных лесных машин, но достаточно редок для гусеничных. При этом после подобного «затопления» колёсного трактора его придётся везти в тёплый бокс, мыть, прочищать манжеты, сальники и т. д. [36]. В то время как для гусеничного трактора, даже если он попадёт в подобную неприятную ситуацию, такого большого количества работ по обслуживанию выполнять не придётся.

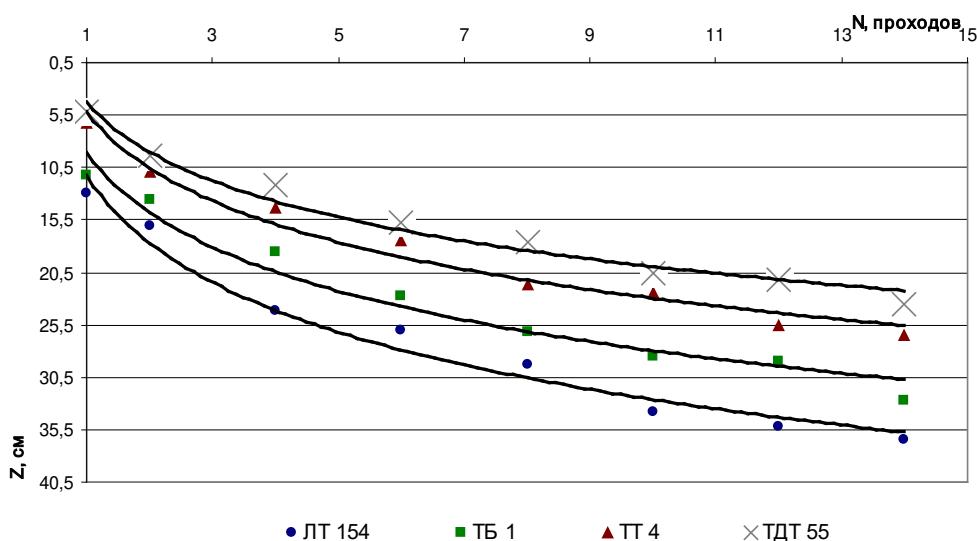


Рисунок 7. Динамика колеообразования гусеничных и колёсного трелёвочных тракторов в зависимости от количества проходов

Figure 7. Dynamics of track formation of tracked and wheeled skidding tractors depending on the number of passes

Для снижения давления на почвогрунты лесосек (увеличения площади контакта с ездовой поверхностью), повышения проходимости на современные гусеничные лесозаготовительные машины (харвестеры на базе экскаваторов) устанавливают уширенную гусеничную ленту с уменьшенным числом грунтозацепов [97] (фото 11).

По сравнению с современными колёсными лесными машинами у гусеничных тракторов значительно проще в устройстве и обслуживании трансмиссия, она заметно менее требовательна к качеству и соблюдению сроков технического обслуживания [98], что в условиях лесозаготовительных предприятий России, особенно мелких, достаточно часто сложно обеспечить [99], [100].



Фото 10. «Затопление» колёсного форвардера при плохих почвенно-грунтовых условиях

Photo 10. «Flooding» of the wheel forwarder under poor soil conditions



Заводской трак экскаватора
(600 мм, три грунтозацепа)



Лесной трак гусеничного харвестера
(700 мм, два грунтозацепа)

Фото 11. Экскаваторный и харвестерный траки

Photo 11. Excavator and harvester tracks

При эксплуатации в условиях значительных отрицательных температур колёсные лесные машины предпочтительно не глушить (хотя это достаточно заметно увеличивает расход топлива, которое стоит сейчас достаточно дорого), поскольку большое количество резиновых уплотнителей и сальников в трансмиссии современного колёсного лесного трактора существенно снижает её надёжность при пуске машины в мороз [101].

Кроме того, в сильный мороз у колёсных машин падает давление в шинах, и его приходится контролировать, резина становится менее эластичной, что вкупе с падением давления вшине может привести к быстрому выходу колеса из строя [102], [103]. Ярким

тому примером служат застраивающие на трассах зимой в Якутии грузовики из-за лопнувших на морозе шин. А стоимость одного колеса (шины) современного лесопромышленного трактора на начало 2023 г. составляет 200—280 тыс. руб. У гусеничных лесных машин таких проблем нет. Комплект гусениц на лесной трактор типа ТТ стоит на начало 2023 г. около 200—250 тыс. руб. При этом, как уже было упомянуто, только один комплект колёсных гусениц стоит в 10 раз дороже, а на одну колёсную лесную машину желательно иметь два комплекта.

Если касаться стоимости колёсных и гусеничных машин в целом, помня о том, что лесозаготовительные предприятия одни из самых небогатых в лесном комплексе, а в связи с падением объёмов и закупочных цен на круглые лесоматериалы в последнее время (из-за введённых санкций) — совсем небогатых, то очень полезно отметить, что при прочих равных условиях стоимость колёсной лесной машины составляет на 40—50 % больше, нежели гусеничной того же класса тяги и назначения [36].

Безусловно, у гусеничных лесных машин, по сравнению с колёсными, есть и ряд существенных недостатков. Прежде всего, это повышенный расход топлива (до 40 % при прочих равных условиях) и значительно меньшие скорости движения (при хороших почвенно-грунтовых условиях, неглубоком снеге), что существенно снижает производительность, особенно на транспортных операциях (прежде всего трелёвке) [48].

При сильно дефрагментированном лесосечном фонде приходится часто и на большие расстояния перевозить комплексы лесных машин (с лесосеки на лесосеку или с одного участка лесовосстановления/проведения других видов лесохозяйственных работ на другой) [104]. Колёсные лесные машины в принципе могут перемещаться при этом своим ходом, а гусеничные приходится перевозить только на трале, задействуя при этом дополнительную технику — тягачи. При этом ещё и не по любой лесной дороге трал сможет пройти. Перемещение гусеничных машин своим ходом по дорогам может привести к разрушению дорожного покрытия, особенно твёрдого. Поэтому в отличие от колёсных движителей гусеничные машины не могут своим ходом перемещаться по дорогам общего пользования. Правда, нельзя забывать о том, что конструкция гидравлической трансмиссии колёсных лесных машин не предназначена для перемещения на длинные дистанции — она начинает перегреваться, разве что форвардер Ponsse-Bison конструктивно предназначен для переездов на длинные расстояния [36].

У гусеничного движителя лесной машины очень большие динамические (ударные) нагрузки во время движения, особенно у трелёвочных тракторов, которые должны на возможно больших скоростях совершать холостые рейсы — к месту набора пачки и грузовые рейсы — к верхнему складу. При наездах на различные препятствия и съездах с них гусеничная лента то натягивается, то провисает, соединительные пальцы бьются в посадочных гнездах, иногда работая как насос, который засасывает в соединение жидкую грязь. Это приводит к достаточно быстрому износу.

Достаточно большой проблемой современного лесного машиностроения в России является очень низкое качество металла, из которого изготавливаются гусеницы для лесных машин [105]. Исходя из приведённого выше понятия «лесные и лесозаготовительные машины», следует уделить внимание вопросу, какие виды гусениц на них используют.

Обратим внимание на то, что лесные машины разного назначения совершают на лесосеке различное количество перемещений, что сказывается не только на конструкции технологического оборудования и движителя, но даже на ёмкости топливного бака. К примеру, ёмкость топливного бака харвестера или ВПМ значительно больше, чему у трелёвочных тракторов [106]. Это связано с тем, что лесозаготовительные машины должны валить деревья, перемещаясь между технологическими стоянками. Большой топливный бак им нужен, чтобы как можно реже им приходилось перемещаться к площадке верхнего склада (или погрузочного пункта) для дозаправки. В то же время трелёвочные тракторы регулярно доставляют на верхний склад (погрузочный пункт) лесоматериалы, и им проще лишний раз заправиться, чем возить на себе большой объём топлива, увеличивая тем самым коэффициент тары трактора, со всеми вытекающими из этого негативными последствиями.

В принципе можно подразделять лесные машины на транспортные и технологические. Транспортные лесные машины, прежде всего трелёвочные тракторы, в меньшей степени погрузчики, совершают большое количество перемещений (грузовой работы), технологические машины перемещаются меньше и выполняют рабочие или смешанные операции — лесозаготовительные машины, процессоры, сучкорезные, и т. д. Есть, правда, транспортно-технологические машины — харвардеры, ВТПМ [107], но в российском лесозаготовительном производстве в настоящее время они не используются.

Гусеничные лесозаготовительные машины (ВПМ, харвестеры), а также лесные машины — процессоры и погрузчики делаются на базе строительных манипуляторных машин — экскаваторов [108].

Как было отмечено выше, для трелёвочных тракторов желательно иметь меньший вес — для снижения удельной энергоёмкости первичного перемещения заготовленных лесоматериалов. В связи с этим гусеничные трелёвочные тракторы оснащаются самыми простыми и лёгкими гусеницами с одноцевочным зацеплением, у которых последовательными шарнирами являются трак и палец, представляющие собой отливки. И всё это собирается с минимальными требованиями к точности, никаких уплотнений со смазкой в таких гусеницах нет. Такая гусеница стоит значительно дешевле, чем гусеницы для строительных машин, но срок её службы достаточно мал. И в связи с уже упомянутым выше существенным снижением качества металла, из которого эти гусеницы изготавливаются, срок службы их ещё более снижается.

Гусеница на строительных тракторах представляет собой цепь с закрытыми звенями, с уплотнениями, в которые закладывается консистентная смазка, и к этой цепи на болты крепятся траки. Такие гусеницы стоят достаточно дорого, но имеют длительный срок эксплуатации. Благодаря смазке интенсивность их износа снижается достаточно

существенно — до 20 %. На фото 12 приведено визуальное сравнение экскаваторной гусеницы и гусеницы трелёвочного трактора.

По вариантам смазки шарниров также гусеницы подразделяют [109]:

- сухие (с открытым металлическим шарниром);
- закрытые (смазка закладывается в шарнир сразу на весь срок эксплуатации);
- с жидкой смазкой (имеются уплотнения, обеспечивающие герметичность шарнира для сохранения смазки);
- с резино-металлическим шарниром (между пальцем и звеном гусеницы устанавливается резиновая втулка);
- с игольчато-подшипниковым шарниром.

При установке на трактор металлических гусениц ведущие колёса имеют форму звёздочки, зубья которой входят в зацепление с гусеничной лентой. Если же на трактор устанавливают резино-металлические гусеницы, то они обычно имеют гладкую поверхность контакта с гладким колесом, у них передача крутящего момента осуществляется трением.



Гусеница экскаватора



Гусеница трелёвочного трактора

Фото 12. Визуальное сравнение экскаваторной гусеницы и гусеницы трелёвочного трактора

Photo 12. Visual comparison of the excavator track and the track of the skidder tractor

В настоящее время Правительство Российской Федерации уделяет большое внимание развитию арктических регионов. Корпорация развития Дальнего Востока и Арктики определяет Арктическую зону как крупнейшую особую экономическую зону в мире, где инвесторы пользуются специальными режимами налогового и административного регулирования.

В Арктическую зону входят девять регионов России (четыре относятся к ней полностью, пять — частично). Площадь арктических территорий составляет 4,8 млн км² (28 % территории России). Ряд арктических регионов России имеет очень большой лесной потенциал: Архангельская область, Республика Саха (Якутия), Республика Карелия.

С экономической точки зрения арктические территории России представляют собой пояс, ориентированный на Северный морской путь, — очень активно развивающийся сейчас Российский транспортный коридор. С климатической точки зрения достаточно часто к арктическим территориям относят леса криолитозоны, являющиеся особо экологически ранимыми и выполняющие крайне важную экологическую функцию — депонирования больших запасов углерода [110]. Проведение лесосечных работ в лесах на вечной мерзлоте (а на них приходится более 50 % всей площади лесного фонда Российской Федерации) очень желательно приурочивать к зимнему периоду, дабы избежать повреждений мерзлотных почвогрунтов [111—116]. Но криолитозона известна своим резко континентальным климатом, длительными, сильными морозами и коротким, жарким летом.

При работе в сильный мороз у любых машин возникают проблемы, связанные с морозной хрупкостью — «охрупчиванием» (Embrittlement) металлов, резины, других используемых в их конструкциях конструкционных материалов. Ведущие производители лесных машин рекомендуют прекращать их эксплуатацию при морозе более -40°C . Да, сейчас несложно приобрести специальную жидкость для гидравлической системы, которая не замёрзнет и при -50°C , но металлическая конструкция лесных машин «сдаётся» значительно раньше.

Совершенно своеобразные условия эксплуатации лесных машин возникают при снежном покрове, который в определённых случаях создаёт столь же неудобные условия работы, как слабые почвогрунты в тёплый период года. Также приходится использовать схемы транспортного освоения лесосек с большей густотой трелёвочных волоков и технологических коридоров. С одной стороны, снежный покров укрывает различные единичные препятствия — в виде брёвен, пней, кочек, камней и т. д. С другой стороны, он увеличивает коэффициент сопротивления перемещению машины, при поворотах гусеничной машины снег норовит забиться в гусеницы, и при этом полезно помнить, что большую часть ездового времени гусеничный трелёвочный трактор движется в режиме поворота.

4. Обсуждение и заключение

Результаты вышеприведённого анализа сложившейся ситуации в современном состоянии лесного машиностроения Российской Федерации, а также с импортом лесных машин, запасных частей и расходных материалов к ним из недружественных стран показывают, что отечественные лесные машины на базе гусеничного шасси имеют очень большие перспективы широкого применения в лесном хозяйстве и в лесозаготовительном производстве. Эти машины, по сравнению с колёсными, значительно экологичнее, дешевле в производстве и эксплуатации, на российских машиностроительных заводах есть большой опыт производства такой техники. За счёт значительно более простой конструкции нет проблем обеспечить 100 %-ю локализацию комплектующих внутри нашей страны. Определённую, но значимую проблему производства лесных машин вообще (и гусеничных,

в частности) вызывает резко ухудшившееся, со времён СССР, качество металлов, поставляемых с отечественных металлургических комбинатов.

Совершенствование конструкции и повышение эффективности эксплуатации гусеничных лесных машин напрямую относится к научной специальности 4.3.4 «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины».

Авторы выражают глубокую признательность участникам и руководителю ведущей российской научной школы лесного комплекса «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета за ценные замечания и ряд фактических данных, существенно способствовавших подготовке данной работы.

Список литературы

1. Сравнение подходов к типологии лесных насаждений России и европейских стран / О. И. Григорьева, А. С. Старовойтова, В. А. Макуев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3 (55). С. 71—77.
2. 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.
3. Куницкая О. А., Помигуев А. В. Повышение эффективности лесопользования за счёт использования непостоянных лесных складов // 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. 314—320.
4. Технология и система машин для разрубки трасс линейных объектов / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, С. Е. Рудов [и др.] // Энергия: экономика, техника, экология. 2019. № 10. С. 62—68.
5. Перспективы импортозамещения систем машин для искусственного лесовосстановления / О. И. Григорьева, В. А. Макуев, Е. В. Барышникова [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3 (55). С. 78—84.
6. Григорьев И. В., Давтян А. Б., Григорьева О. И. Выбор системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // 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. 271—278.
7. Лучшие практики подготовки операторов лесных машин / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, С. Е. Рудов [и др.] // Строительные и дорожные машины. 2020. № 10. С. 42—48.
8. Концепция универсальной машины для выполнения лесохозяйственных работ и тушения лесных пожаров / О. И. Григорьева, А. Б. Давтян, О. И. Гринько [и др.] // Машиностроение: новые концепции и технологии. Всерос. научно-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. Красноярск, 2020. С. 45—49.

9. Тетеревлева Е. В., Гринько О. И., Григорьева О. И. Транспортно-технологические машины для тушения лесных пожаров на базе колёсных вездеходов // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2020. С. 374—377.
10. Перспективная лесохозяйственная машина / А. Ю. Мануковский, М. В. Зорин, О. И. Григорьева [и др.] // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: Сб. науч. ст. по итогам Шестой междунар. науч. конф. Казань, 2020. С. 141—143.
11. Григорьев И. В. Параметры и показатели работы перспективного форвардера для малообъёмных лесозаготовок // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6. № 4 (40). С. 21—25.
12. Статистический анализ параметров колёсных трелёвочных машин / А. М. Хахина, И. В. Григорьев, А. М. Газизов [и др.] // Хвойные бореальными зонами. 2018. Т. 36, № 2. С. 189—197.
13. Григорьева О. И., Давтян А. Б., Гринько О. И. Перспективы импортозамещения в производстве лесохозяйственных и лесопожарных машин в России // Лесоэксплуатация и комплексное использование древесины: Сб. ст. Всерос. научно-практич. конф. Красноярск, 2020. С. 66—69.
14. Математическая модель выбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций / О. Б. Марков, Р. В. Воронов, А. Б. Давтян [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. 2021. № 1. С. 16—26.
15. Математическая модель модульного принципа подбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций / Р. В. Воронов, О. Б. Марков, И. В. Григорьев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 5 (371). С. 125—134.
16. Численное исследование показателей заготовки древесины на лесных плантациях / Г. Д. Гаспарян, А. Б. Давтян, И. В. Григорьев [и др.] // Resources and Technology. 2021. Т. 18, № 4. С. 17—45.
17. Григорьева О. И., Давтян А. Б. Эффективная технология расчистки древесно-кустарниковой растительности // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Седьмой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2021. С. 34—35.
18. Технология и машины лесовосстановительных работ: Учеб. пособие / Р. Р. Сафин, И. В. Григорьев, О. И. Григорьева [и др.] / М.: Деревообрабатывающая пром-сть, 2015. 230 с.
19. Основы лесного хозяйства: Учеб. пособие / Р. Р. Сафин, И. В. Григорьев, О. И. Григорьева [и др.]. М.: Деревообрабатывающая пром-сть, 2015. 170 с.
20. Пути повышения эффективности работы лесных машин / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, С. Е. Рудов [и др.] // Энергия: экономика, техника, экология. 2020. № 1. С. 55—63.
21. 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.
22. Efficiency improvement of forest machinery exploitation / I. Grigorev, O. Kunickaya, A. Prosuzhikh [et al.] // Diagnostyka. 2020. Vol. 21, no. 2. P. 95—109.
23. 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.

24. Григорьева О. И., Григорьев И. В. Повышение эффективности кадрового обеспечения лесного комплекса Российской Федерации // Архитектура университетского образования: построение единого пространства знаний: Сб. тр. IV Национал. научно-метод. конф. с междунар. участием. СПб., 2020. С. 123—130.
25. Скобцов И. Г., Куницкая О. А. Требования стандартов по безопасности при работе на лесных машинах // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производстве. 2022. № 1. С. 51—56.
26. Технология и машины лесосечных работ: Учебник для вузов / В. И. Патякин, И. В. Григорьев, А. К. Редькин [и др.]; Под ред. В. И. Патякина. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2012. 362 с.
27. Скобцов И. Г., Куницкая О. А. Обзор конструктивных решений защитных устройств кабин лесных машин // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производстве. 2022. № 1. С. 60—69.
28. Григорьев И. В., Григорьева О. И. Постановка задачи экономической оценки улучшения условий труда и безопасности работы операторов лесных машин // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производстве. 2022. № 4. С. 43—48.
29. Скобцов И. Г., Куницкая О. А. Математическая модель оценки энергопоглощающих свойств устройства защиты оператора лесной машины // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производстве. 2022. № 3. С. 40—50.
30. Скобцов И. Г., Куницкая О. А. Исследование динамических нагрузок, действующих на кабину лесной машины при различных вариантах возникновения аварийных ситуаций // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производстве. 2022. № 3. С. 28—39.
31. Григорьев И. В., Григорьева О. И. Общие методические вопросы эргономической оценки системы «оператор — производственная среда — машина» // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производстве. 2022. № 5. С. 17—22.
32. Григорьев И. В., Григорьева О. И., Чураков А. А. Эффективные технологии и системы машин для малообъемных заготовок древесины // Энергия: экономика, техника, экология. 2018. № 2. С. 61—66.
33. Никифоров О. А., Григорьева О. И. Основные трудовые требования в схемах добровольной лесной сертификации в рамках стандартов цепочки поставок // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производстве. 2022. № 4. С. 53—63.
34. Григорьева О. И., Данилов Д. А., Григорьев И. В. Безопасность и охрана труда в свете требований международных систем добровольной лесной сертификации // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производстве. 2022. № 1. С. 4—20.
35. Современные технические решения для обеспечения безопасной работы лесных машин на горных склонах / В. А. Каляшов, Т. А. До, О. И. Григорьева [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производстве. 2022. № 2. С. 11—25.
36. 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.

37. Перспективные направления развития технологических процессов лесосечных работ / И. В. Григорьев, О. И. Григорьева, А. И. Никифорова [и др.] // Труды БГТУ. № 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2016. № 2 (184). С. 109—116.
38. Григорьев И. В., Григорьев М. Ф., Степанова Д. И. Перспективы модульных систем машин для лесозаготовительного производства в Якутии // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5, № 9 (35). С. 74—77.
39. Совершенствование конструкции полноповоротных лесозаготовительных машин на экскаваторных базах / А. П. Мохирев, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая [и др.] // Строительные и дорожные машины. 2018. № 6. С. 43—49.
40. 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.
41. Григорьева О. И., Гринько О. И., Николаева Ф. В. Лесопожарные транспортно-технологические комплексы на базе колёсных форвардеров // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2021. С. 55—58.
42. Григорьев И. В., Куницкая О. А. Эффективное использование погрузочной техники на лесных складах // Энергия: экономика, техника, экология. 2021. № 6. С. 42—57.
43. Григорьев И. В., Чураков А. А. Совершенствование конструкции активного полуприцепа форвардера на базе сельскохозяйственного колёсного трактора // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2018. С. 84—88.
44. Григорьев И. В., Григорьева О. И. Лесозаготовительные машины на экскаваторной базе // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы IV Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2018. С. 45—46.
45. Theoretical approaches to logging trail network planning: increasing efficiency of forest machines and reducing their negative impact on soil and terrain / S. E. Rudov, A. M. Voronova, J. M. Chemshikova [et al.] // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2019. Vol. 16, no. 4. P. 61—75.
46. Добрецов Р. Ю., Григорьев И. В., Газизов А. М. Пути улучшения управляемости лесных и транспортных гусеничных машин // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2017. № 3 (43). С. 97—106.
47. Рудов С. Е., Григорьев И. В. Пути повышения эффективности работы систем машин для сортиментной заготовки древесины // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Седьмой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2021. С. 168—169.
48. Григорьев И. В. Снижение отрицательного воздействия на почву колёсных трелёвочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: ЛТА, 2006. 236 с.
49. Средоощадящие технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации / И. В. Григорьев, А. И. Жукова, О. И. Григорьева [и др.]. СПб.: Изд-во ЛТА, 2008. 176 с.
50. Рудов С. Е., Швецова В. В. Инновационные направления научных исследований в лесопользовании // Современные инновации: фундаментальные и прикладные исследования: Сб. науч. тр. по материалам VIII Междунар. научно-практич. конф. М., 2018. С. 6—9.

51. Михайлова Л. М., Куницкая О. А., Мотовилов А. И. Перспективы систем машин на базе средств малой механизации для малообъёмных лесозаготовок и лесохозяйственных работ // Стратегия и перспективы развития агротехнологий и лесного комплекса Якутии до 2050 года: Сб. науч. ст. по материалам Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием, посвящённой 100-летию образования Якутской АССР и 85-летию Первого президента РС (Я) М. Е. Николаева (Николаевские чтения). Якутск, 2022. С. 735—742.
52. Григорьев И. В., Винокуров С. Л. Сравнение вариантов систем машин для малообъёмных лесозаготовок // Вестник АГАТУ. 2021. № 3 (3). С. 51—62.
53. Григорьев И. В., Никифорова А. И., Лисов В. Ю. Достоинства и недостатки колёсной и гусеничной баз лесопромышленных тракторов // Леспроминформ. 2014. № 4 (102). С. 82—87.
54. Выращивание и эксплуатация лесных плантаций / А. Вагвелди, Ш. Фехер, Б. Хорват [и др.]. Ужгород: University of West Hungary Press, 2016. 132 с.
55. Рего Г. Э., Воронов Р. В., Григорьев И. В. Алгоритм локального поиска для задачи покрытия полигона лесом корневых деревьев // Инженерный вестник Дона. 2022. № 10 (94). С. 240—259.
56. Ильюшенко Д. А., Песков В. Б., Григорьев И. В. Современные лесозаготовительные машины: анализ взаимосвязей их характеристик // Февральские чтения: Сб. материалов научно-практич. конф. профессорско-преподавательского состава Сыктывкар. лесного института по итогам научно-исследовательской работы в 2015 году. Сыктывкар, 2016. С. 127—130.
57. Григорьев И. В., Чураков А. А. Перспективный машинный комплекс для заготовки древесины // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона: Материалы II междунар. научно-практич. форума. Хабаровск: Изд-во ТАГУ, 2017. С. 170—175.
58. Григорьева О.И. Эффективность транспортно-технологических систем для лесного хозяйства // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2018. С. 79—83.
59. Теоретическое обоснование параметров средоощадящего движителя гусеничного вездехода / О. Н. Бурмистрова, Ю. М. Чемшикова, И. В. Григорьев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 3 (43). С. 81—88.
60. Добрецов Р. Ю., Григорьев И. В. Оценка энергоэффективности шасси гусеничных лесных машин // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы междунар. научно-техн. конф. Тюмень, 2017. С. 145—149.
61. Григорьев И. В., Чураков А. А., Григорьева О. И. Перспективная конструкция гусеничного форвардера // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы междунар. научно-техн. конф. Тюмень, 2017. С. 140—144.
62. Григорьев И. В., Чураков А. А., Григорьева О. И. Перспективная конструкция вездехода для лесного хозяйства // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы междунар. научно-техн. конф. Тюмень, 2017. С. 136—139.
63. Добрецов Р. Ю., Григорьев И. В., Иванов В. А. Увеличение подвижности гусеничных вездеходов для вахтовых лесозаготовок // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 2 (30). С. 114—119.
64. Добрецов Р. Ю., Григорьев И. В. Взаимодействие гусеничного движителя с почвогрунтом при значительном продольном смещении центров давления // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: Материалы научно-техн. конф. СПб.: СПбГЛТУ, 2016. С. 124—127.

65. Увеличение подвижности гусеничных и колёсных машин / Р. Ю. Добрецов, И. В. Григорьев, С. Е. Рудов [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 11. С. 4—10.
66. Методика последовательного анализа и определения стандартов отклонений от проектных параметров лесовозных автомобильных дорог / П. В. Тихомиров, А. В. Скрыпников, В. Г. Козлов [и др.] // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 3. С. 69—82.
67. Обоснование методики оценки экологической эффективности лесопользования / И. В. Григорьев, О. И. Григорьева, А. И. Никифорова [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2012. № 6 (69). С. 72—77.
68. Определение энергоёмкости продуктов лесопользования в рамках методики оценки экологической эффективности лесопользования / И. В. Григорьев, Е. Г. Хитров, А. И. Никифорова [и др.] // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2014. Т. 19, № 5. С. 1499—1502.
69. *Григорьев И. В., Рудов С. Е.* Особенности эксплуатации колёсных лесных машин в сложных почвенно-грунтовых и рельефных условиях // Forest Engineering: Материалы научно-практич. конф. с междунар. участием. Якутск, 2018. С. 67—71.
70. Оценка экологической безопасности работы лесных машин / А. И. Никифорова, О. И. Григорьева, Д. С. Киселев [и др.] // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона: Материалы Междунар. научно-практич. форума. Хабаровск, 2013. С. 134—138.
71. Определение осадки при движении лесозаготовительной машины по двуслойному основанию / А. И. Никифорова, Е. Г. Хитров, А. А. Пельмский [и др.] // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2014. № 2 (139). С. 87—91.
72. *Никифорова А. И., Рудов М. Е., Григорьева О. И.* Экспериментальные исследования уплотнения боковых полос трасс трелёвки волочащейся частью трелюемой пачки лесоматериалов // Проблемно-ориентированные исследования: теория и практика: Материалы республикан. научно-практич. конф. Петрозаводск, 2014. С. 37—39.
73. Поиск новых технических решений для повышения экологической совместимости лесных машин с лесной средой / И. В. Григорьев, И. И. Тихонов, О. И. Григорьева [и др.] // Интенсификация формирования и охраны интеллектуальной собственности: Материалы республикан. научно-практич. конф., посвящённой 75-летию ПетрГУ. Петрозаводск, 2015. С. 9—11.
74. *Никифорова А. И., Григорьева О. И.* Моделирование воздействия движителей лесных машин на почвы лесосек // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 5-4 (16-4). С. 320—323.
75. Modelling of indenter pressed into heterogeneous soil / A. Yu. Zhuk, A. M. Hahina, I. V. Grigorev [et al.] // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Vol. 13, no. S8. P. 6419—6430.
76. *Измайлова В. С., Григорьева О. И.* Оценка успешности естественного возобновления ели после сплошных рубок в Лисинском лесничестве // Актуальные вопросы в лесном хозяйстве: Материалы молодёжной междунар. научно-практич. конф. СПб.: Политехн. ун-т, 2017. С. 31—34.
77. *Григорьева О. И.* Особенности естественного лесовосстановления в условиях криолитозоны // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6, № 4 (40). С. 25—29.
78. О важности исследований экологической эффективности процесса трелёвки / А. В. Калистратов, О. И. Григорьева, Г. В. Григорьев [и др.] // Наука, образование,

- инновации в приграничном регионе: Материалы республикан. научно-практич. конф. Петрозаводск, 2015. С. 7—9.
79. Теоретические исследования работы лесных машин с гусеничным движителем на склонах / Т. А. До, Г. В. Григорьев, В. А. Каляшов [и др.] // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 3. С. 1—29.
80. Обоснование технологических параметров, связанных с тягово-цепными свойствами гусеничной машины, работающей на склоне / Т. А. До, Н. И. Злобина, В. А. Каляшов [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. 2022. № 2. С. 3—12.
81. Хитров Е. Г., Котенев Е. В. Сравнение показателей взаимодействия с грунтом и проходимости колёсных и колёсно-гусеничных движителей // Resources and Technology. 2019. Т. 16, № 4. С. 1—24.
82. Беляева Н. В., Григорьева О. И., Ицук Т. А. Влияние рубок ухода разной интенсивности на общую производительность ельников кисличных // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 3 (11). С. 140—148.
83. Беляева Н. В., Григорьева О. И., Кузнецов Е. Н. Влияние рекреационной нагрузки на развитие подроста древесных пород в городском парке «Сосновка» // Аграрный научный журнал. 2014. № 9. С. 6—11.
84. Результаты экспериментальных исследований влияния температуры почвогрунтов криолитозоны на их физико-механические свойства / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Лесотехнический журнал. 2020. Т. 10, № 4 (40). С. 197—207.
85. Методика и аппаратура экспериментальных исследований динамики температур слоёв лесного почвогрунта криолитозоны / М. С. Новиков, О. А. Куницкая, С. Е. Рудов [и др.] // Стратегия и перспективы развития агротехнологий и лесного комплекса Якутии до 2050 года: Сб. науч. ст. по материалам Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием, посвящённой 100-летию образования Якутской АССР и 85-летию Первого президента РС (Я) М. Е. Николаева (Николаевские чтения). Якутск, 2022. С. 760—767.
86. Хитров Е. Г., Фролов И. И. Подбор допустимого давления движителя колёсных лесных машин в зависимости от грунтовых условий // Сборник статей по материалам научно-технической конференции Института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2018 года / Отв. ред. В. А. Соколова. СПб.: ЛТУ, 2019. С. 90—100.
87. Comparing approaches of calculating soil pressure of forestry machines / E. Khitrov, A. Andronov, D. Iliushenko [et al.] // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference proceedings. Soils; forest ecosystems. Sophia, 2019. P. 649—656.
88. Хитров Е. Г. Анализ составляющих глубины колеи, образующейся под воздействием движителя лесной машины на почвогрунт // Resources and Technology. 2019. Т. 16, № 4. С. 76—93.
89. Theoretical model for evaluation of tractive performance of forestry machine's wheel / V. Ivanov, M. Stepanishcheva, E. Khitrov [et al.] // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings. Sophia, 2018. P. 997—1004.
90. Linking the deformation moduli and cone indices of forest and peatland soils / E. Khitrov, V. Ivanov, M. Stepanishcheva [et al.] // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings. Sophia, 2018. P. 297—304.
91. Модель для оценки радиальной деформации колеса лесной машины с учётом деформации почвогрунта / Е. Г. Хитров, И. В. Григорьев, В. А. Макуев [и др.] // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2015. Т. 19, № 6. С. 87—90.

92. Моделирование уплотнения почвогрунта в боковых полосах трелёвочного волока с учётом изменчивости трассы движения / В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, Д. В. Лепилин [и др.] // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2010. № 6 (111). С. 61—64.
93. Расчёт показателей процесса уплотнения почвогрунта при трелёвке пачки хлыстов / И. В. Григорьев, В. А. Макуев, В. Я. Шапиро [и др.] // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2013. № 2. С. 112—118.
94. Исследование экологичности и вопросы сертификации движителей лесных машин / Е. Г. Хитров, Е. В. Котенев, А. В. Андронов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 2 (46). С. 100—105.
95. Хитров Е. Г., Ильюшенко Д. А., Ермакова Е. К. Линейные функции коэффициентов сопротивления движению и сцепления движителей лесных машин с грунтом // Научно-техническая конференция по итогам научно-исследовательских работ 2019 года: Сб. ст. по материалам конф. / Отв. ред. В. А. Соколова. СПб.: ЛТУ, 2020. С. 88—94.
96. Хитров Е. Г., Ильюшенко Д. А., Ермакова Е. К. Расчёт касательного напряжения с учётом снижения удельного сцепления лесного грунта при буксировании движителя // Научно-техническая конференция по итогам научно-исследовательских работ 2019 года Сб. ст. по материалам конф. / Отв. ред. В. А. Соколова. СПб.: ЛТУ, 2020. С. 105—110.
97. Шэн Ю., Москаленко М. Б., Добрецов Р. Ю. Принципы построения шасси экстремальной проходимости для эксплуатации в лесном комплексе // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Восьмой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2022. С. 208—209.
98. Кузнецов Д. А., Добрецов Р. Ю. Вально-планетарный трансформирующий механизм для лесных и транспортных машин // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Восьмой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2022. С. 92—94.
99. 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.
100. Григорьев И. В., Куницкая О. А., Фам Н. Л. Применение мобильных технологий для мониторинга, контроля и управления процессами сервиса лесных машин // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: Сб. материалов Всерос. научно-практич. конф. / Отв. ред.: Ю. А. Безруких, Е. В. Мельникова. Красноярск, 2020. С. 143—146.
101. Григорьев И. В. Особенности эксплуатации лесных машин в сильные морозы // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: Материалы междунар. научно-техн. конф. молодых учёных / Гл. ред. И. С. Сазонов. Могилев, 2018. С. 102.
102. Модернизация системы контроля давления в шинах лесных и сельскохозяйственных машин / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, Ю. В. Ланских [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2021. № 2. С. 21—30.
103. Григорьев И. В., Проскужих А. А., Рудов С. Е. Перспективы использования систем контроля давления в шинах лесных и сельскохозяйственных машин // Машиностроение: новые концепции и технологии. Всерос. научно-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. Красноярск, 2020. С. 40—45.
104. 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 Внутривузов. научно-практич. конф., посвящённой 65-летию высш. аграрного образования Республики

Саха (Якутия) и Всерос. студ. научно-практич. конф. с междунар. участием в рамках «Северного форума — 2021». Якутск, 2021. С. 265—271.

105. 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.
106. Совершенствование конструкции валочно-пакетирующей машины / И. В. Григорьев, И. И. Тихонов, А. И. Никифорова [и др.] // Леса России в XXI веке: Материалы Девятой междунар. научно-техн. интернет-конференции. СПб., 2012. С. 53—56.
107. 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.
108. Перспективы создания лесозаготовительных комплексов на базе отечественных строительных и сельскохозяйственных машин / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, А. А. Просужих [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 10. С. 3—10.
109. Гуревич А. М., Болотов А. К., Судницын В. И. Конструкция тракторов и автомобилей. М.: Агропромиздат, 1989. 368 с.
110. Экологические и лесоводственные аспекты работы лесных машин в лесах криолитозоны / М. Е. Рудов, О. А. Куницкая, М. Ф. Григорьев [и др.] // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. № 57. С. 14—17.
111. 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.
112. Specific features of accounting of state of the massive of the frozen soil grounds under cyclic loads / S. E. Rudov, I. V. Grigorev, O. A. Kunickaya [et al.] // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2019. Vol. 25, no. Suppl. 2. P. 191—205.
113. The mathematical model of forestry machines impact on cryolitozone forest soils / S. Rudov, O. Kunickaya, I. Grigorev [et al.] // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2020. Vol. 17, no. 4. P. 89—95.
114. Исследование процесса разрушения мёрзлых и оттаивающих почвогрунтов при воздействии трелёвочной системы / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2020. № 2 (374). С. 101—117.
115. Особенности контактного взаимодействия трелёвочной системы с мёрзлым почвогрунтом / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 1 (367). С. 106—119.
116. Проблемы и перспективы лесозаготовительного производства в условиях районов распространения вечной мерзлоты / Г. В. Григорьев, И. Н. Дмитриева, И. В. Григорьев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 3 (51). С. 59—67.

References

1. Grigoreva O. I., Starovoitova A. S., Makuev V. A., Tikhonov E. A., Kolominova M. V., Grigorev I. V. Comparison of approaches to the typology of forest plantations in Russia and European countries. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 3 (55), pp. 71—77. (In Russ.)
2. 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.)

3. Kunitskaya O. A., Pomiguyev A. V. Improving the efficiency of forest management through the use of non-permanent forest warehouses. *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. 314—320. (In Russ.)
4. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Rudov S. E., Davtyan A. B. Technology and system of machines for cutting tracks of linear objects. *Energy: economics, technology, ecology*, 2019, no. 10, pp. 62—68. (In Russ.)
5. Grigoreva O. I., Makuev V. A., Baryshnikova E. V., Burmistrova O. N., Shvetsova V. V., Grigorev I. V., Ivanov V. A. Prospects of import substitution of machine systems for artificial reforestation. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 3 (55), pp. 78—84. (In Russ.)
6. Grigorev I. V., Davtyan A. B., Grigoreva O. I. The choice of a system of machines for the creation and operation of forest plantations. *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. 271—278. (In Russ.)
7. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Rudov S. E., Grigoreva O. I., Voynash S. A. The best practices of training operators of forest machines. *Construction and road vehicles*, 2020, no. 10, pp. 42—48. (In Russ.)
8. Grigoreva O. I., Davtyan A. B., Grinko O. I., Voynash S. A. The concept of a universal machine for performing forestry work and extinguishing forest fires. *Mashinostroenie: new concepts and technologies. All-Russian Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists.* Krasnoyarsk, 2020, pp. 45—49. (In Russ.)
9. Teterevleva E. V., Grinko O. I., Grigoreva O. I. Transport-technological machines for extinguishing forest fires on the basis of wheeled all-terrain vehicles. *Transport and transport-technological systems. Materials of the International Scientific and Technical Conference.* Editor N. S. Zakharov. Tyumen, 2020, pp. 374—377. (In Russ.)
10. Manukovsky A. Yu., Zorin M. V., Grigoreva O. I., Davtyan A. B., Kunitskaya O. A., Grigorev I. V. Perspective forestry machine. *Priority directions of innovation activity in industry. Collection of scientific articles on the results of the sixth international scientific conference.* Kazan, 2020, pp. 141—143. (In Russ.)
11. Grigorev I. V. Parameters and performance indicators of a promising forwarder for low-volume logging. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2018, vol. 6, no. 4 (40), pp. 21—25. (In Russ.)
12. Khakhina A. M., Grigorev I. V., Gazizov A. M., Kunitskaya O. A. Statistical analysis of parameters of wheeled skidding machines. *Coniferous boreal zones*, 2018, vol. 36, no. 2, pp. 189—197. (In Russ.)
13. Grigoreva O. I., Davtyan A. B., Grinko O. I. Prospects of import substitution in the production of forestry and forest fire fighting machines in Russia. *Forest exploitation and integrated use of wood. Collection of articles of the All-Russian Scientific and Practical Conference.* Krasnoyarsk, 2020, pp. 66—69. (In Russ.)
14. Markov O. B., Voronov R. V., Davtyan A. B., Grigorev I. V., Kalita G. A. Mathematical model of choosing a system of machines for the creation and operation of forest plantations. *Woodworking industry*, 2021, no. 1, pp. 16—26. (In Russ.)
15. Voronov R. V., Markov O. B., Grigorev I. V., Davtyan A. B. Mathematical model of the modular principle of selecting a system of machines for the creation and operation of forest

plantations. *News of higher educational institutions. Forest Magazine*, 2019, no. 5 (371), pp. 125—134. (In Russ.)

16. Gasparyan G. D., Davtyan A. B., Grigorev I. V., Markov O. B., Grigoreva O. I. Numerical study of wood harvesting indicators on forest plantations. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, no. 4, pp. 17—45. (In Russ.)
17. Grigoreva O. I., Davtyan A. B. Effective technology of clearing wood and shrub vegetation. *Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Seventh All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2021, pp. 34—35. (In Russ.)
18. Safin R. R., Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Razumov E. Y. *Technology and machines of reforestation works. Textbook*. Moscow, Woodworking industry, 2015. 230 p. (In Russ.)
19. Safin R. R., Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Razumov E. Y. *Fundamentals of forestry. Textbook*. Moscow, Woodworking industry, 2015. 170 p. (In Russ.)
20. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Rudov S. E., Davtyan A. B. Ways to improve the efficiency of forest machines. *Energy: economics, technology, ecology*, 2020, no. 1, pp. 55—63. (In Russ.)
21. 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.)
22. Grigorev I., Kunickaya O., Prosuzhikh A., Kruchinin I., Shakiryanov D., Shvetsova V., Markov O., Egipko S. Efficiency improvement of forest machinery exploitation. *Diagnostika*, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 95—109.
23. 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.)
24. Grigoreva O. I., Grigorev I. V. Improving the efficiency of staffing of the forest complex of the Russian Federation. *Architecture of university education: building a unified knowledge space. proceedings of the IV National Scientific and Methodological Conference with international participation*. St. Petersburg, 2020, pp. 123—130. (In Russ.)
25. 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.)
26. Patyakin V. I., Grigorev I. V., Redkin A. K., Ivanov V. A., Posarnikov F. V., Shegelman I. R., Shirnin Yu. A., Katsadze V. A., Valyazhonkov V. D., Bit Yu. A., Matrosov A. V., Kunitskaya O. A. *Technology and machines of logging operations. Textbook for universities*. Edited by V. I. Patyakin. St. Petersburg, Publishing House of SPbGPU, 2012. 362 p. (In Russ.)
27. Skobtsov I. G., Kunitskaya O. A. Review of design solutions of protective devices of cabins of forest machines. *Occupational safety and health in logging and woodworking industries*, 2022, no. 1, pp. 60—69. (In Russ.)
28. Grigorev I. V., Grigoreva O. I. Formulation of the task of economic assessment of improving working conditions and safety of operators of forest machines. *Safety and labor protection in logging and woodworking industries*, 2022, no. 4, pp. 43—48. (In Russ.)
29. Skobtsov I. G., Kunitskaya O. A. Mathematical model for assessing the energy-absorbing properties of the protection device of the operator of the forest machine. *Occupational safety and health in logging and woodworking industries*, 2022, no. 3, pp. 40—50. (In Russ.)
30. Skobtsov I. G., Kunitskaya O. A. Investigation of dynamic loads acting on the cabin of a forest machine in various variants of emergency situations. *Occupational safety and health in logging and woodworking industries*, 2022, no. 3, pp. 28—39. (In Russ.)

31. Grigorev I. V., Grigoreva O. I. General methodological issues of ergonomic evaluation of the system «operator — production environment — machine». *Safety and labor protection in logging and woodworking industries*, 2022, no. 5, pp. 17—22. (In Russ.)
32. Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Churakov A. A. Effective technologies and systems of machines for low-volume wood blanks. *Energy: economics, technology, ecology*, 2018, no. 2, pp. 61—66. (In Russ.)
33. Nikiforov O. A., Grigoreva O. I. Basic labor requirements in voluntary forest certification schemes within the framework of supply chain standards. *Safety and labor protection in logging and woodworking industries*, 2022, no. 4, pp. 53—63. (In Russ.)
34. Grigoreva O. I., Danilov D. A., Grigoriev I. V. Safety and labor protection in the light of the requirements of international systems of voluntary forest certification. *Safety and labor protection in logging and woodworking industries*, 2022, no. 1, pp. 4—20. (In Russ.)
35. Kalyashov V. A., Do T. A., Grigoreva O. I., Guryev A. Yu., Novogorodov D. V. Modern technical solutions for ensuring the safe operation of forest machines on mountain slopes. *Safety and labor protection in logging and woodworking industries*, 2022, no. 2, pp. 11—25. (In Russ.)
36. 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*. St. Petersburg, Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions, 2019. 192 p. (In Russ.)
37. Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Nikiforova A. I., Glukhovsky V. M. Perspective directions of development of technological processes of logging operations. *Proceedings of BSTU. No. 2. Forestry and woodworking industry*, 2016, no. 2 (184), pp. 109—116. (In Russ.)
38. Grigorev I. V., Grigorev M. F. Stepanova D. I. Systems of machines for logging production in Yakutia Prospects of modular systems of machines for logging production in Yakutia. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2017, vol. 5, no. 9 (35), pp. 74—77. (In Russ.)
39. Mohirev A. P., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigorjeva O. I., Voynash S. A. Improving the design of full-turn logging machines on excavator bases. *Construction and road vehicles*, 2018, no. 6, pp. 43—49. (In Russ.)
40. 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.)
41. Grigoreva O. I., Grinko O. I., Nikolaeva F. V. Forest fire transport and technological complexes based on wheel forwarders. *Transport and transport-technological systems. Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Ed. N. S. Zakharov. Tyumen, 2021, pp. 55—58. (In Russ.)
42. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A. Effective use of loading equipment in forest warehouses. *Energy: economics, technology, ecology*, 2021, no. 6, pp. 42—57. (In Russ.)
43. Grigorev I. V., Churakov A. A. Improving the design of an active forwarder semi-trailer based on an agricultural wheeled tractor. *Transport and transport-technological systems. Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Ed. N. S. Zakharov. Tyumen, 2018, pp. 84—88. (In Russ.)
44. Grigorev I. V., Grigoreva O. I. Logging machines on an excavator base. *Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the IV All-Russian Scientific and Practical conference with international participation*. Petrozavodsk, 2018, pp. 45—46. (In Russ.)
45. Rudov S. E., Voronova A. M., Chemshikova Y. M., Teterevleva E. V., Kruchinin I. N., Dondokov Yu. Zh., Khaldeeva M. N., Burtseva I. A., Danilov V. V., Grigoriev I. V. Theoretical approaches to planning a network of logging trails: increasing the efficiency of logging

machines and reducing their negative impact on the soil and relief. *Asian Journal of Water Resources, Environment and Pollution*, 2019, vol. 16, no. 4, pp. 61—75.

46. Dobretsov R. Yu., Grigorev I. V., Gazizov A. M. Ways to improve the controllability of forest and transport tracked vehicles. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*, 2017, no. 3 (43), pp. 97—106. (In Russ.)
47. Rudov S. E., Grigorev I. V. Ways to improve the efficiency of machine systems for sorting wood harvesting. *Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Seventh All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2021, pp. 168—169. (In Russ.)
48. Grigorev I. V. *Reducing the negative impact on the soil of wheeled skidding tractors by substantiating their movement modes and technological equipment*. St. Petersburg, LTA, 2006. 236 p. (In Russ.)
49. Grigorev I. V., Zhukova A. I., Grigoreva O. I., Ivanov A. V. *Environmental technologies for the development of cutting areas in the conditions of the North-Western region of the Russian Federation. Scientific edition*. St. Petersburg, LTA Publishing House, 2008. 176 p. (In Russ.)
50. Rudov S. E., Shvetsova V. V. Innovative directions of scientific research in forest management. *Modern innovations: fundamental and applied research. Collection of scientific papers based on the materials of the VIII International Scientific and Practical Conference*. Moscow, 2018, pp. 6—9. (In Russ.)
51. Mikhailova L. M., Kunitskaya O. A., Motovilov A. I. Prospects of machine systems based on small-scale mechanization for low-volume logging and forestry work. *Strategy and prospects for the development of agrotechnologies and the forest complex of Yakutia until 2050. Collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation dedicated to the 100th anniversary of the formation of the Yakut ASSR and the 85th anniversary of the First President of the RS (Ya) M. E. Nikolaev (Nikolaev readings)*. Yakutsk, 2022, pp. 735—742. (In Russ.)
52. Grigorev I. V., Vinokurov S. L. Comparison of variants of machine systems for low-volume logging. *Bulletin of AGATU*, 2021, no. 3 (3), pp. 51—62. (In Russ.)
53. Grigorev I. V., Nikiforova A. I., Lisov V. Y. Advantages and disadvantages of wheeled and tracked bases of timber tractors. *Lesprominform*, 2014, no. 4 (102), pp. 82—87. (In Russ.)
54. Vagveldi A., Feher Sh., Horvat B., Koman S., Kovach G., Szabo L., Tsupi I., Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Danilov D., Kunitskaya O. A., Krivash E. *Cultivation and exploitation of forest plantations*. Uzhgorod, Publishing house: University of West Hungary Press, 2016. 132 p. (In Russ.)
55. Rego G. E., Voronov R. V., Grigorev I. V. A local search algorithm for the problem of covering a polygon with a forest of root trees. *Engineering Bulletin of the Don*, 2022, no. 10 (94), pp. 240—259. (In Russ.)
56. Ilyushenko D. A., Peskov V. B., Grigorev I. V. Modern logging machines: analysis of interrelations of their characteristics. *February 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 2015*. Syktyvkar, 2016, pp. 127—130. (In Russ.)
57. Grigorev I. V., Churakov A. A. Perspective machine complex for wood harvesting. *Natural resources and ecology of the Far Eastern region. Materials of the II International Scientific and Practical Forum*. Khabarovsk, TAGU Publishing House, 2017, pp. 170—175. (In Russ.)
58. Grigoreva O. I. Efficiency of transport-technological systems for forestry. *Transport and transport-technological systems. Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Ed. N. S. Zakharov. Tyumen, 2018, pp. 79—83. (In Russ.)

59. Burmistrova O. N., Chemshikova Yu. M., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Tambi A. A. Theoretical substantiation of the parameters of the medium-sparing propulsion of a tracked all-terrain vehicle. *Systems. Methods. Technologies*, 2019, no. 3 (43), pp. 81—88. (In Russ.)
60. Dobretsov R. Yu., Grigorev I. V. Assessment of the energy efficiency of the chassis of tracked forest machines. *Transport and transport-technological systems. Materials of the international scientific and technical conference*. Tyumen, 2017, pp. 145—149. (In Russ.)
61. Grigorev I. V., Churakov A. A., Grigoreva O. I. Perspective design of a tracked forwarder. *Transport and transport-technological systems. Materials of the international scientific and technical conference*. Tyumen, 2017, pp. 140—144. (In Russ.)
62. Grigorev I. V., Churakov A. A., Grigoreva O. I. Perspective design of an all-terrain vehicle for forestry. *Transport and transport-technological systems. Materials of the international scientific and technical conference*. Tyumen, 2017, pp. 136—139. (In Russ.)
63. Dobretsov R. Yu., Grigorev I. V., Ivanov V. A. Increasing the mobility of tracked all-terrain vehicles for shift logging. *Systems. Methods. Technologies*, 2016, no. 2 (30), pp. 114—119. (In Russ.)
64. Dobretsov R. Yu., Grigorev I. V. The interaction of a caterpillar mover with a soil with a significant longitudinal displacement of pressure centers. *Forests of Russia: politics, industry, science, education. Materials of the scientific and technical conference*. St. Petersburg, SPbGLTU, 2016, pp. 124—127. (In Russ.)
65. Dobretsov R. Yu., Grigorev I. V., Rudov S. E., Teterevleva E. V., Chemshikova Yu. M. Increasing the mobility of tracked and wheeled vehicles. *Repair. Recovery. Modernization*, 2019, no. 11, pp. 4—10. (In Russ.)
66. Tikhomirov P. V., Skrypnikov A. V., Kozlov V. G., Tveritnev O. N., Grigorev I. V. Methodology of sequential analysis and determination of standards of deviations from the design parameters of logging highways. *Resources and technologies*, 2022, vol. 19, no. 3, pp. 69—82. (In Russ.)
67. Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Nikiforova A. I., Kunitskaya O. A. Substantiation of the methodology for assessing the ecological efficiency of forest management. *Bulletin of KrasGAU*, 2012, no. 6 (69), pp. 72—77. (In Russ.)
68. Grigorev I. V., Khitrov E. G., Nikiforova A. I., Grigoreva O. I., Kunitskaya O. A. Determination of the energy intensity of forest management products within the framework of the methodology for assessing the environmental efficiency of forest management. *Bulletin of the Tambov University. Series: Natural and Technical Sciences*, 2014, vol. 19, no. 5, pp. 1499—1502. (In Russ.)
69. Grigorev I. V., Rudov S. E. Features of the operation of wheeled forest machines in difficult soil-soil and relief conditions. *Forest Equipment. Materials of the scientific and practical conference with international participation*. Yakutsk, 2018, pp. 67—71. (In Russ.)
70. Nikiforova A. I., Grigoreva O. I., Kiselev D. S., Khakhina A. M., Rudov M. E. Assessment of ecological safety of forest machinery. *Natural resources and ecology of the Far Eastern region. Materials of the International Scientific and Practical Forum*. Khabarovsk, 2013, pp. 134—138. (In Russ.)
71. Nikiforova A. I., Khitrov E. G., Pelymsky A. A., Grigoreva O. I. Determination of precipitation during the movement of a logging machine on a two-layer base. *Scientific notes of Petrozavodsk State University*, 2014, no. 2 (139), pp. 87—91. (In Russ.)
72. Nikiforova A. I., Rudov M. E., Grigoreva O. I. Experimental studies of compaction of side lanes of skidding tracks by the dragging part of a trellised bundle of timber. *Problem-oriented research: theory and practice. Materials of the Republican scientific and practical conference*.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Petrozavodsk State University». Petrozavodsk, 2014, pp. 37—39. (In Russ.)

73. Grigorev I. V., Tikhonov I. I., Grigoreva O. I., Rudov M. E. Search for new technical solutions to improve the ecological compatibility of forest machines with the forest environment. *Intensification of the formation and protection of intellectual property. Materials of the republican scientific and practical conference dedicated to the 75th anniversary of PetrSU.* Petrozavodsk, Petrozavodsk State University, 2015, pp. 9—11. (In Russ.)
74. Nikiforova A. I., Grigoreva O. I. Modeling of the impact of forest machinery movers on the soils of cutting areas. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 5-4 (16-4), pp. 320—323. (In Russ.)
75. Zhuk A. Yu., Khakhina A. M., Grigorev I. V., Ivanov V. A., Gasparyan G. D., Manukovsky A. Yu., Kunitskaya O. A., Danilenko O. K., Grigoreva O. I. Modeling indentation of an indenter in an inhomogeneous soil. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 13, no. S8, pp. 6419—6430.
76. Izmailova V. S., Grigoreva O. I. Evaluation of the success of the natural renewal of spruce after continuous logging in Lisinsky forestry. *Current issues in forestry. Materials of the youth international scientific and practical conference.* St. Petersburg, 2017, pp. 31—34. (In Russ.)
77. Grigoreva O. I. Features of natural reforestation in the conditions of the cryolithozone. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2018, vol. 6, no. 4 (40), pp. 25—29. (In Russ.)
78. Kalistratov A. V., Grigoreva O. I., Grigorev G. V., Dmitrieva I. N. On the importance of research on the ecological efficiency of the skidding process. *Science, education, innovations in the border region. Materials of the Republican scientific and practical conference.* Petrozavodsk, Petrozavodsk State University, 2015, pp. 7—9. (In Russ.)
79. Do T. A., Grigorev G. V., Kalyashov V. A., Guryev A. Yu., Grigoreva O. I., Khitrov E. G. Theoretical studies of the work of forest machines with a caterpillar engine on slopes. *Resources and technologies*, 2022, vol. 19, no. 3, pp. 1—29. (In Russ.)
80. Do T. A., Zlobina N. I., Kalyashov V. A., Novgorodov D. V., Grigoreva O. I., Khitrov E. G. Substantiation of technological parameters related to traction-coupling properties of a tracked vehicle operating on a slope. *Woodworking industry*, 2022, no. 2, pp. 3—12. (In Russ.)
81. Khitrov E. G., Kotenev E. V. Comparison of indicators of interaction with the ground and the patency of wheeled and wheeled-tracked propellers. *Resources and technologies*, 2019, vol. 16, no. 4, pp. 1—24. (In Russ.)
82. Belyaeva N. V., Grigoreva O. I., Ishchuk T. A. The influence of logging of different intensity on the overall productivity of sour spruce forests. *Systems. Methods. Technologies*, 2011, no. 3 (11), pp. 140—148. (In Russ.)
83. Belyaeva N. V., Grigoreva O. I., Kuznetsov E. N. Influence of recreational load on the development of undergrowth of tree species in the city park «Sosnovka». *Agrarian Scientific Journal*, 2014, no. 9, pp. 6—11. (In Russ.)
84. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I., Storodubtseva T.N. Results of experimental studies of the influence of the temperature of cryolithozone soils on their physical and mechanical properties. *Forestry Journal*, 2020, vol. 10, no. 4 (40), pp. 197—207. (In Russ.)
85. Novikov M. S., Kunitskaya O. A., Rudov S. E., Kalyashov V. A. Methodology and equipment of experimental studies of temperature dynamics of layers of forest soil of the cryolithozone. *Strategy and prospects of development of agrotechnologies and the forest complex of Yakutia until 2050. Collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation dedicated to the 100th anniversary*

of the formation of the Yakut ASSR and the 85th anniversary of the First President of the RS (Ya) M. E. Nikolaev (Nikolaev readings). Yakutsk, 2022, pp. 760—767. (In Russ.)

86. Khitrov E. G., Frolov I. I. Selection of the permissible pressure of the mover of wheeled forest vehicles depending on ground conditions. *Collection of articles based on the materials of the scientific and technical conference of the Institute of Technological Machines and Transport of Forests based on the results of research works in 2018.* Ed. V. A. Sokolov. St. Petersburg, LTU, 2019, pp. 90—100. (In Russ.)
87. Khitrov E., Andronov A., Ilyushenko D., Kotenev E. Comparison of approaches to calculating the pressure on the ground of logging machines. *19th International Interdisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2019. Conference materials. Soils; forest ecosystems.* Sophia, 2019, pp. 649—656.
88. Khitrov E. G. Analysis of the components of the depth of the track formed under the influence of the propulsion of the forest machine on the soil. *Resources and technologies*, 2019, vol. 16, no. 4, pp. 76—93. (In Russ.)
89. Ivanov V., Stepanishcheva M., Khitrov E., Ilyushenko D. Theoretical model for estimating the traction force of a logging machine wheel. *18th International Interdisciplinary Scientific Geoconference SGEM. 2018. Conference materials.* Sophia, 2018, pp. 997—1004.
90. Khitrov E., Ivanov V., Stepanishcheva M., Kochnev A. Interrelation of deformation modules and taper indices of forest and peat soils. *18th International Interdisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2018. Conference materials.* Sophia, 2018, pp. 297—304.
91. Khitrov E. G., Grigorev I. V., Makuev V. A., Khakhina A. M., Kalinin S. Y. A model for assessing the radial deformation of the wheel of a forest machine taking into account the deformation of the soil. *Bulletin of the Moscow State University of Forests — Lesnoy Vestnik*, 2015, vol. 19, no. 6, pp. 87—90. (In Russ.)
92. Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Lepilin D. V., Zhukova A. I. Modeling of soil compaction in the side lanes of the skidding portage taking into account the variability of the traffic route. *Scientific notes of Petrozavodsk State University*, 2010, no. 6 (111), pp. 61—64. (In Russ.)
93. Grigorev I. V., Makuev V. A., Shapiro V. Ya., Rudov M. E., Nikiforova A. I. Calculation of indicators of the soil compaction process when skidding a pack of whips. *Bulletin of the Moscow State University of the Forest — Forest Bulletin*, 2013, no. 2, pp. 112—118. (In Russ.)
94. Khitrov E. G., Kotenev E. V., Andronov A. V., Zhang S. A., Nikiforova V. A. Research of environmental friendliness and issues of certification of forest machinery movers. *The system. Methods. Technologies*, 2020, no. 2 (46), pp. 100—105. (In Russ.)
95. Khitrov E. G., Ilyushenko D. A., Ermakova E. K. Linear functions of coefficients of resistance to movement and coupling of propellers of forest machines with the ground. *Scientific and technical conference on the results of scientific research in 2019. Collection of articles based on the conference materials.* Ed. V. A. Sokolova. St. Petersburg, LTU, 2020, pp. 88—94. (In Russ.)
96. Khitrov E. G., Ilyushenko D. A., Ermakova E. K. Calculation of tangential stress taking into account the decrease in the specific adhesion of forest soil when the mover is slipping. *Scientific and technical conference on the results of scientific research in 2019. Collection of articles based on the conference materials.* Ed. V. A. Sokolova. St. Petersburg, LTU, 2020, pp. 105—110. (In Russ.)
97. Shen Yu., Moskalenko M. B., Dobretsov R. Yu. Principles of construction of extreme terrain chassis for operation in the forest complex. *Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Eighth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation.* Petrozavodsk, 2022, pp. 208—209. (In Russ.)

98. Kuznetsov D. A., Dobretsov R. Yu. Valno-planetary transforming mechanism for forest and transport machines. *Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Eighth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation.* Petrozavodsk, 2022, pp. 92—94. (In Russ.)
99. 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.)
100. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Fam N. L. Application of mobile technologies for monitoring, control and management of forest machinery service processes. *Innovations in the chemical-forest complex: trends and prospects of development. Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference.* Responsible ed. Yu. A. Bezrukikh, E. V. Melnikova. Krasnoyarsk, 2020, pp. 143—146. (In Russ.)
101. Grigorev I. V. Features of operation of forest machines in severe frosts. *New materials, equipment and technologies in industry. Materials of the international scientific and technical conference of young scientists.* Ed. I. S. Sazonov. Mogilev, 2018, p. 102. (In Russ.)
102. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Lanskikh Yu. V., Sandakov S. Yu., Prosuzhikh A. A., Rudov S. E. Modernization of the tire pressure monitoring system for forest and agricultural machines. *Repair. Recovery. Modernization*, 2021, no. 2, pp. 21—30. (In Russ.)
103. Grigorev I. V., Prosuzhikh A. A., Rudov S. E. Prospects of using pressure monitoring systems in tires of forest and agricultural machines. *Mashinostroenie: new concepts and technologies. All-Russian Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists.* Krasnoyarsk, 2020, pp. 40—45. (In Russ.)
104. 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.)
105. 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.)
106. Grigorev I. V., Tikhonov I. I., Nikiforova A. I., Grigorieva O. I. Improving the design of the felling-packing machine. *Forests of Russia in the XXI century. Materials of the ninth International Scientific and Technical Internet conference.* St. Petersburg, 2012, pp. 53—56. (In Russ.)
107. Grigorev I. V., Nikiforova A. I., Grigoreva O. I. Comparison of single-machine complexes for sorting wood harvesting. *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.)
108. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Prosuzhikh A. A., Davtyan A. B., Rudov S. E. Prospects of creation of logging complexes on the basis of domestic construction and agricultural machines. *Repair. Recovery. Modernization*, 2020, no. 10, pp. 3—10.
109. Gurevich A. M., Bolotov A. K., Sudnitsyn V. I. *Construction of tractors and cars.* Moscow, Agropromizdat, 1989. 368 p. (In Russ.)
110. Rudov M. E., Kunitskaya O. A., Grigorev M. F., Stepanova D. I., Grigoreva A. 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.)

111. 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.* Ed. N. S. Zakharov. Tyumen, 2020, pp. 323—326. (In Russ.)
112. Rudov S. E., Grigorev I. V., Kunickaya O. A., Druzyanova V. P., Ivanov A. K., Okhlopkova M. K., Pankov V. Y., Pekhutov A. S., Ivanov A. P., Borovikov R. G. Specific features of accounting of state of the massive of the frozen soil grounds under cyclic loads. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2019, vol. 25, no. Suppl. 2, pp. 191—205.
113. Rudov S., Kunickaya O., Grigorev I., Burgoontdinov A., Kruchinin I., Prosuzhii A., Dolmatov N., Dmitrieva N. The mathematical model of forestry machines impact on cryolitozone forest soils. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2020, vol. 17, no. 4, pp. 89—95.
114. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Investigation of the process of destruction of frozen and thawing soils under the influence of a skidding system. *News of higher educational institutions. Forest Magazine*, 2020, no. 2 (374), pp. 101—117. (In Russ.)
115. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Features of the contact interaction of the skidding system with frozen soil. *News of higher educational institutions. Forest Magazine*, 2019, no. 1 (367), pp. 106—119. (In Russ.)
116. Grigorev G. V., Dmitrieva I. N., Grigorev I. V., Kalyashov V. A., Rudov S. E., Ivanov V. A. Problems and prospects of logging production in permafrost distribution areas. *Systems. Methods. Technologies*, 2021, no. 3 (51), pp. 59—67. (In Russ.)

© Карасев Ю. А., Марков В. А., Дмитриев А. С., Должиков И. С., Юдилевич А. М., 2023

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6783

УДК 674.8

Статья

Влияние длины измельчаемого отрезка бревна на фракционный состав щепы

Васильев Сергей Борисович

доктор технических наук, профессор, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), servas@petrsu.ru

Девятникова Людмила Анатольевна

кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), dev@petrsu.ru

Колесников Геннадий Николаевич

доктор технических наук, профессор, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), kgn@petrsu.ru

Получена: 15 января 2023 / Принята: 27 февраля 2023 / Опубликована: 4 марта 2023

Аннотация: Было замечено, что в условиях реального производства длина балансов, подаваемых в рубительную машину, оказывает влияние на фракционный состав щепы. Теоретическое изучение этого вопроса подтверждает наличие корреляции между длиной измельчаемых балансов и фракционным составом получаемой щепы. В частности, результат теоретического исследования показал, что фракционный состав щепы, полученной при измельчении отрезков брёвен дисковой рубительной машиной, зависит от их длины. Аналитическое исследование показало, что с увеличением длины измельчаемого отрезка (при прочих равных условиях) выход кондиционной фракции растёт. Таким образом, после проведения теоретических исследований были поставлены две задачи, которые следовало решить с помощью экспериментальных исследований. Первая — проверить влияние длины перерабатываемых отрезков бревна на фракционный состав щепы, вырабатываемой дисковыми рубительными машинами. Вторая — установить, как доля короткомера в общем потоке сырья, подаваемого в дисковую рубительную машину, влияет на фракционный состав щепы в условиях реального производства. Результаты исследований на экспериментальной установке показали, что между длиной отрезка бревна, измельчаемого в дисковой рубительной машине, и фракционным составом получаемой щепы существует

зависимость при верхнем и нижнем способах выброса щепы. Уменьшение длины измельчаемого отрезка в исследованном диапазоне скоростей резания (17—38 м/с) приводит к снижению доли кондиционной фракции в щепе. В ходе эксперимента в производственных условиях также установлена зависимость между долей короткомеров в массиве сырья, подаваемого в рубительную машину, и фракционным составом вырабатываемой щепы. Зависимости массовых долей различных фракций щепы с достаточной для практики точностью могут быть аппроксимированы линейными выражениями. Исследования в производственных условиях показали, что уменьшение доли отрезков брёвен длиной не более 0,8 м в общем объёме балансов от 68 до 38 % ведёт к увеличению выхода кондиционной фракции в щепе на 2,5 %. При этом также происходит уменьшение долей крупной и мелких фракций на 0,8 % на 1,7 % соответственно. Уравнения регрессии, полученные по результатам производственного эксперимента, позволили установить предельно допустимую долю короткомеров в потоке сырья. Таким образом, получение щепы, отвечающей по фракционному составу требованиям к щепе марки Ц1 по ГОСТ 15815-83, возможно в рубительной машине с ножевым диском диаметром 2500 мм, если в подаваемом на измельчение потоке балансов доля отрезков длиной не более 0,8 м не превышает 45 %.

Ключевые слова: производство щепы; машина рубительная дисковая; баланс

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6783

Article

The effect of the chipping log sections length on the fractional composition of wooden chips

Sergey Vasilyev

D. Sc. in engineering, professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),

servas@petrsu.ru

Lyudmila Devyatnikova

Ph. D. in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),

dev@petrsu.ru

Gennady Kolesnikov

D. Sc. in engineering, professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),

kgn@petrsu.ru

Received: 15 January 2023 / Accepted: 27 February 2023 / Published: 4 March 2023

Abstract: It was noticed that in the course of actual manufacturing process the length of the pulpwood fed into the disk chipper affects the fractional composition of the chips. A theoretical study confirmed the existence of a correlation between the length of the pulpwood and the fractional composition of the chips. In particular, the result of the theoretical study showed that the fractional composition of the chips manufactured from sections of logs chipped by a disk chipper depends on their length. Analytical research demonstrated that with the increased length of the chipped segment (all other things being equal), the yield of the standard chips increased. Thus, two tasks were set to be solved in an experimental way. The first one was to check the effect of the log chipping sections length on the fractional composition of the chips produced by a disk chipper. The second one was to establish how the proportion of short length sections of logs in the total flow of raw material supplied to the disk chipper affects the fractional composition of chips under actual industrial conditions. The experimental results showed that there was a correlation between the length of a log section crushed in a disk chipper and the fractional composition of the resulting chips when both upper and lower methods of chip evacuation were used. A decrease in the length of the crushed section in the studied cutting speed range (17-38 m/s) led to a decrease in the proportion of the standard fraction in the chips. During the industrial experiment, a correlation was also established between the proportion of short sections of logs in the total batch of raw material supplied to the chipper and the fractional composition of the chips produced.

The dependences of the mass content of various fractions of wood chips can be approximated by linear expressions with a reasonable degree of accuracy. Studies in industrial conditions showed that a decrease in the proportion of log sections with a length of no more than 0.8 m in the total amount of pulpwood from 68 to 38% led to an increase in the yield of the standard fraction in wood chips by 2.5%. At the same time, there was also a decrease in the proportions of oversized and small fractions by 0.8% and 1.7%, respectively. The regression equations obtained from the results of the industrial experiment made it possible to establish the maximum permissible proportion of short sections of logs in the flow of raw material. Thus, the manufacture of wood chips that meets the fractional composition requirements for wood chips of the C1 brand according to GOST 15815-83 is possible in a chipper with a knife disk with a diameter of 2500 mm, if the proportion of log sections with a length of no more than 0.8 m does not exceed 45% in the flow of pulpwood supplied for chipping.

Keywords: chips production; disk chipper; pulpwood

1. Введение

Технологический процесс, осуществляемый на целлюлозно-бумажных комбинатах (далее — ЦБК), предусматривает распиловку поступивших круглых лесоматериалов на мерные отрезки. Длина этих отрезков определяется конструкциями корободирочного барабана, рубительной машины и дефибрёра. Таким образом, доставляемые на ЦБК брёвна длиной от 3,00 до 6,50 м должны быть распилены на отрезки длиной 1,2 м. В связи с этим для выполнения этой технологической операции используют слешеры (фото 1).



Фото 1. Слешерная установка

Photo 1. Slesher

Соотношение между длинами распиливаемых брёвен и расстоянием между пилами неизбежно приводит к образованию короткомеров (фото 2).



Фото 2. Короткомеры, образовавшиеся в результате раскряя брёвен

Photo 2. Short log sections formed as a result of logs cross-sawing

Все полученные на слешере отрезки брёвен поступают на один конвейер, которым подаются на дальнейшую переработку в древесно-подготовительный цех (далее — ДПЦ). При производстве технологической щепы используются все отрезки длиной до 1,2 м, полученные на слешере. Таким образом, длина отрезков, загружаемых в рубительную машину, варьируется в широких пределах (фото 3). Конечно, основную часть сырья составляют отрезки стандартного размера, однако доля короткомеров в общей массе доходит в отдельные моменты до 70 %. То есть в отдельные короткие периоды рубительная машина производит щепу практически из короткомеров. В ходе предварительного изучения было замечено, что в условиях реального производства длина балансов, подаваемых в рубительную машину, оказывает влияние на фракционный состав щепы [1], [5].

Теоретическое изучение этого вопроса подтверждает наличие корреляции между длиной измельчаемых балансов и фракционным составом получаемой щепы [2]. В частности, результат теоретического исследования показал, что фракционный состав щепы, полученной в результате измельчения отрезков брёвен дисковой рубительной машиной, зависит от их длины. А именно: чем больше длина измельчаемого баланса (при прочих равных условиях), тем больше выход кондиционной фракции.



Фото 3. Конвейер подачи сырья в рубительную машину

Photo 3. Conveyor for feeding raw materials to the chipper

Таким образом, после проведения теоретических исследований были поставлены две задачи, которые следовало решить в условиях экспериментальных исследований:

- проверить влияние длины перерабатываемых отрезков бревна на фракционный состав щепы, вырабатываемой дисковыми рубительными машинами;
- установить, как доля короткомера в общем потоке сырья, подаваемого в рубительную машину, влияет на фракционный состав щепы в производственных условиях.

2. Материалы и методы

2.1. Исследования на полупромышленной установке

Задачами экспериментальных исследований, проводившихся на полупромышленной установке, являлись изучение влияния длины, перерабатываемого баланса при различных значениях скорости резания на фракционный состав щепы при верхнем и горизонтальном способах выброса. При проведении экспериментальных исследований измельчались еловые образцы, очищенные от коры. Древесина измельчавшихся образцов не содержала гнили, имела степень окорки не ниже 90 %, массовая доля влаги в ней была 45—50 %. Температура образцов была около + 10 °C. Размеры образцов: диаметр 12 см, длина одной партии 0,5 м, длина другой партии 1,2 м.

До начала исследований была проведена серия рубок с целью определения минимальной скорости резания, при которой возможен верхний выброс щепы из установки. Значение этой скорости оказалось равным 17 м/с и явилось нижним пределом варьирования скоростей резания при верхнем выбросе щепы из полупромышленной установки. При использовании безударного выброса щепы минимальное значение скорости резания составляло 10 м/с. Верхний предел для обоих способов выброса щепы соответствовал наибольшим значениям скорости резания у существующих машин и составил 38 м/с.

Работы проводились на плоском диске с ножами, имеющими прямую заточку. Ряд конструктивных параметров поддерживался на следующем уровне: расчётная длина щепы 19 мм, состояние ножей — острые, зазор между ножами и контрножом 0,8—1,0 мм, угол заострения ножей 32°, угол примыкания патрона 38°.

Полупромышленная установка (фото 4) была создана на базе серийного образца дисковой рубительной машины МРНП-30. При этом конструкция установки позволяла создавать различные комбинации изучаемых параметров, поддерживая остальные на постоянном уровне.

Основным рабочим органом установки является ножевой диск с валом, установленный в подшипниковых опорах. На периферии диска устанавливаются лопатки для удаления щепы из кожуха: при верхнем способе выброса щепы — 16 лопаток, при горизонтальном — две лопатки.

Установка оснащена загрузочным патроном для наклонной подачи сырья (фото 5). Проходное сечение патрона имеет V-образное основание и рассчитано на переработку отрезков брёвен с максимальным диаметром 280 мм. Требуемый зазор между ножами диска и контрножами обеспечивается горизонтальным перемещением патрона при помощи регулировочных винтов.

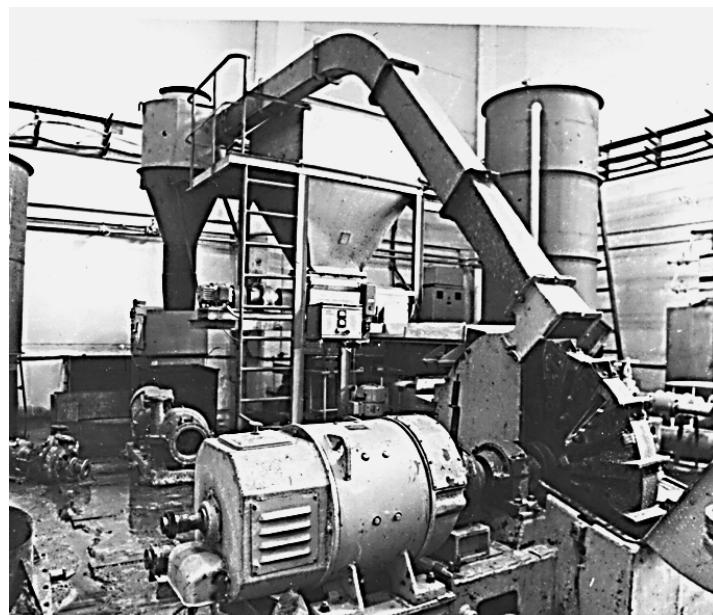


Фото 4. Общий вид экспериментальной установки при верхнем способе выброса щепы

Photo 4. General view of the experimental unit with the upper method of chip evacuation

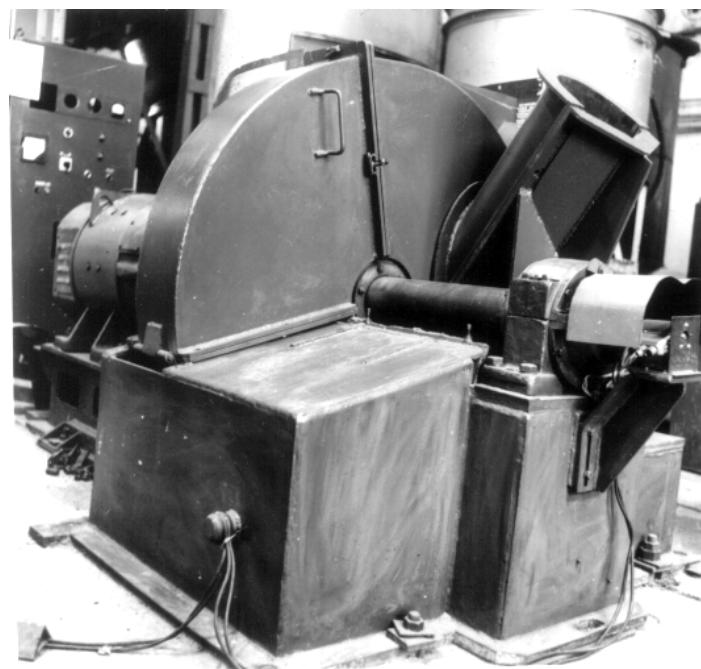


Фото 5. Вид на экспериментальную установку со стороны загрузки

Photo 5. View of the experimental installation from the loading side

Для экспериментальной установки были изготовлены два кожуха, которыми она оснащалась в зависимости от изучавшегося способа выброса щепы: кожух для верхнего способа выброса щепы и кожух для горизонтального способа выброса щепы. У кожуха для верхнего способа выброса щепы верхняя часть выполнена в виде горловины, которая щепопроводом соединена с циклоном. Кожух для горизонтального способа выброса щепы имеет с приводной стороны (фото 6) напротив окна загрузочного патрона установленный горизонтально щепоотводящий патрубок. Угол между осью патрубка и осью вращения вала диска в горизонтальной плоскости выполнен равным 10° , что позволяет учесть предполагаемое смещение направления факела выброса щепы, возникающее под действием центробежных сил. В верхней части кожуха устанавливается отбойная лопатка, которая совместно с лопатками, установленными на ободе диска, служит для более эффективного удаления через патрубок щепы, попавшей в нижнюю часть кожуха.

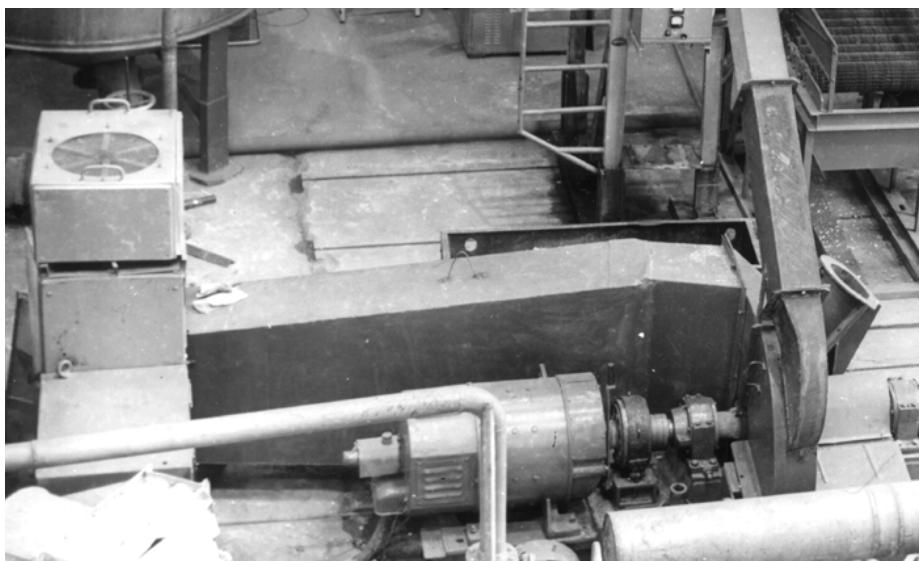


Фото 6. Общий вид экспериментальной установки при горизонтальном способе выброса щепы

Photo 6. General view of the experimental unit with a horizontal method of chips evacuation

Привод установки выполнен регулируемым. Регулирование частоты вращения ротора электродвигателя осуществляется путём изменения выпрямленного напряжения вниз от номинального на якоре электродвигателя. При этом частота вращения может быть изменена от 1000 до 100 мин⁻¹.

Работа установки осуществляется следующим образом. Древесина (отрезок окорённого бревна) по загрузочному патрону подаётся к ножевому диску, при вращении которого измельчается на щепу ножами. Образовавшаяся щепа проходит на приводную сторону диска через подножевые щели и в дальнейшем удаляется из кожуха. При верхнем способе выброса

щепа ударяется о заднюю стенку кожуха и падает вниз, где подхватывается лопатками и создаваемым ими при вращении диска воздушным потоком выбрасывается через горловину в верхней части кожуха по щепопроводу в циклон. При горизонтальном способе выброса щепы, прошедшая через подножевую щель, не встретив на пути своего движения препятствия, каким при верхнем способе выброса является задняя стенка кожуха, удаляется в щепоотводящий патрубок. Незначительная часть щепы, которая по тем или иным причинам может остаться внутри кожуха, удаляется оттуда при помощи воздушного потока, созданного лопатками, установленными на диске, и отбойной лопаткой.

2.2. Исследования в производственных условиях

Исследование проводилось в производственных условиях древесно-подготовительного цеха целлюлозно-бумажного комбината в период с августа по сентябрь. Отбор проб для определения фракционного состава вырабатываемой щепы осуществлялся круглосуточно.

Сырьём для производства древесной массы и технологической щепы на предприятии была еловая древесина. По данным технической лаборатории древесно-подготовительного цеха, на рубительную машину подаются балансы температурой 30—40 °C и влажностью 70 %. Отличие в показателях температуры и влажности по сравнению с исследованием на экспериментальной установке вызвано тем, что в производственных условиях древесное сырьё подавалось в рубительную машину непосредственно после корообдирочного барабана.

В древесно-подготовительном цехе установлены две рубительные машины марки МР5-150 со следующими техническими характеристиками: максимальный диаметр перерабатываемых балансов 625 мм, расчётная длина щепы 20 мм, диаметр ножевого диска 2500 мм, количество ножей на диске 15 шт., частота вращения диска 365 мин⁻¹. Скорость резания на номинальном диаметре 18 м/с. Направление подачи сырья в рубительную машину — наклонное, выброс щепы вверх, в циклон. Из циклона щепа попадает на ленточный конвейер, которым подаётся на сортировку щепы СЩ-600-1. Заметим, что вопросы влияния особенностей технологии производства щепы на геометрические параметры её частиц рассмотрены также в работе [3].

Перед забором проб щепы визуально оценивалось содержание короткомеров на конвейере между корообдирочным барабаном и рубительной машиной. При этом короткомерами считались все отрезки брёвен длиной от 10 до 80 см. Этот показатель рассчитывался по формуле $s = a/b \times 100\%$, где s — доля короткомеров в потоке сырья, %; a — количество короткомеров, шт.; b — общее количество балансов, подаваемых в рубительную машину, шт.

Всего в ходе исследования было выполнено 150 измерений. Пробы щепы брались круглосуточно, с интервалом 6—9 ч, т. е. один-два раза в смену. Щепа отбиралась в ёмкость объёмом 8 дм³ непосредственно на выбросе из циклона. Для каждой пробы проводился фракционный анализ щепы. Определение фракционного состава щепы производилось согласно ГОСТ 15815-83 «Щепа технологическая. Технические условия» [4].

Из навески выбирались частицы, полностью состоящие из коры или гнили и щепы с частичным наличием коры и гнили. Кору и гниль отделяли от щепы, присоединяли к отобранной коре и гнили и взвешивали. Максимальная масса коры в одной навеске зафиксирована в размере 5 г, что составило 0,21 % от массы навески. Средний показатель массовой доли коры по всем измерениям составил 0,011 %. Максимальный вес гнили зафиксирован на уровне 40 г, что составило 1,65 % от веса навески. Средний показатель массовой доли гнили по всем измерениям составил 0,011 %.

Для определения фракционного состава щепы использовался анализатор ситовый механический марки АЛГ-М с набором контрольных сит с отверстиями диаметром 30, 20, 10, 5 мм и поддон. Соотношение размеров отверстий в сите и размеров частиц таково, что только часть материала остаётся на сите, а другая его часть в виде более мелких частиц проходит через отверстия.

При описании результатов анализов фракционного состава щепы использованы следующие известные понятия: крупная фракция — остаток на сите с отверстиями диаметром 30 мм; кондиционная фракция — сумма остатков на ситах с отверстиями 20 и 10 мм; мелкая фракция — остаток на сите с отверстиями диаметром 5 мм; отсев — остаток на поддоне анализатора.

3. Результаты экспериментальных исследований

3.1. Исследования на экспериментальной установке

Представленные на рисунках 1—4 результаты исследования показывают, что при верхнем способе выброса щепы длина измельчаемых балансов оказывает влияние на фракционный состав щепы. Уменьшение длины больше всего сказывается на массовой доле кондиционной щепы. Так, при скорости резания 17 м/с отмечено минимальное снижение доли кондиционной фракции — 0,6 %, при скорости резания 24 м/с — 2,0 %, при скорости резания 31 м/с достигает максимума — 2,5 %, а при скорости резания 38 м/с опять начинает снижаться и составляет 1,5 %.

Массовая доля крупной фракции и отсева при измельчении коротких балансов больше при всех скоростях резания. Разница между значениями имеет ту же тенденцию, что и у кондиционной фракции, т. е. достигает своего максимума при скорости резания 31 м/с, а минимума — при скорости резания 17 м/с. Что касается мелкой фракции, то на неё длина баланса оказывает небольшое влияние. Доля мелкой фракции имеет существенное отличие только при скорости резания 31 м/с.

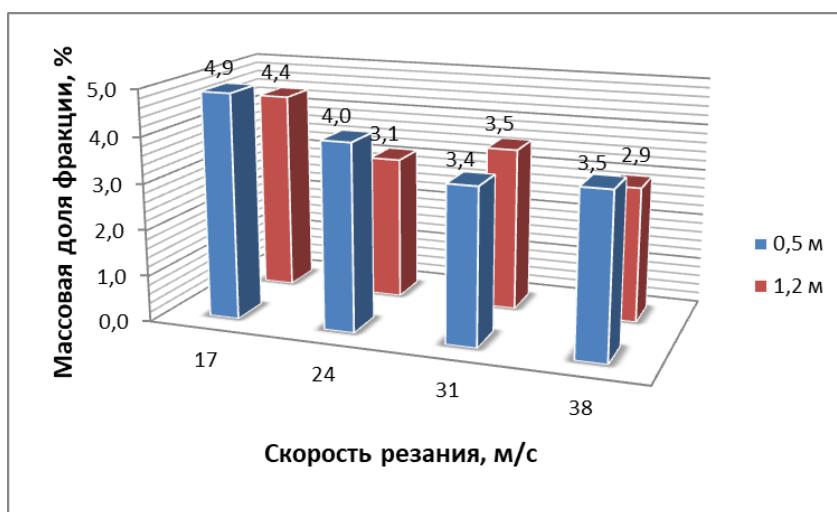


Рисунок 1. Массовая доля крупной фракции (остаток на сите с отверстиями диаметром 30 мм) в зависимости от скорости резания и длины измельчаемого баланса при верхнем выбросе щепы

Figure 1. The mass content of an oversize fraction (the residue on a sieve with holes 30 mm in diameter), depending on the cutting speed and the length of the cut pulpwood when the upper way of wood chips evacuation is used

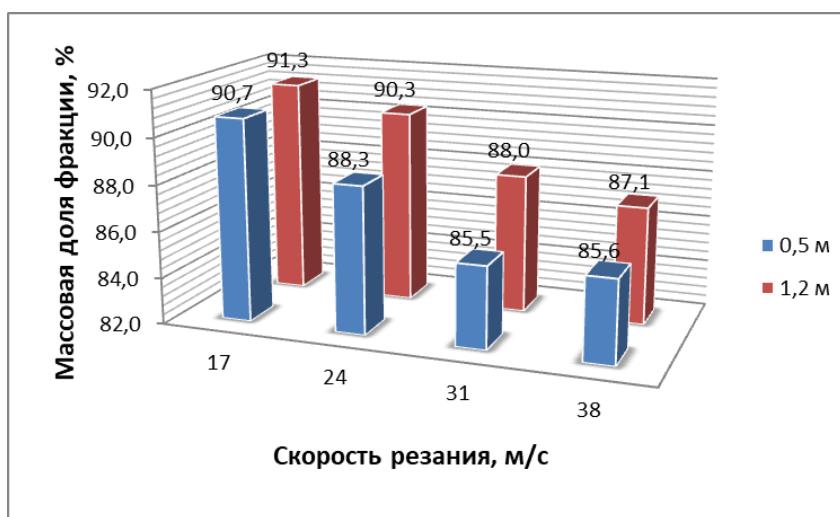


Рисунок 2. Массовая доля кондиционной фракции (сумма остатков на ситах с отверстиями диаметром 20 и 10 мм) в зависимости от скорости резания и длины измельчаемого баланса при верхнем выбросе щепы

Figure 2. The mass content of the accepted fraction (the sum of residues on sieves with holes 20 and 10 mm in diameter), depending on the cutting speed and the length of the cut pulpwood when the upper way of wood chips evacuation is used

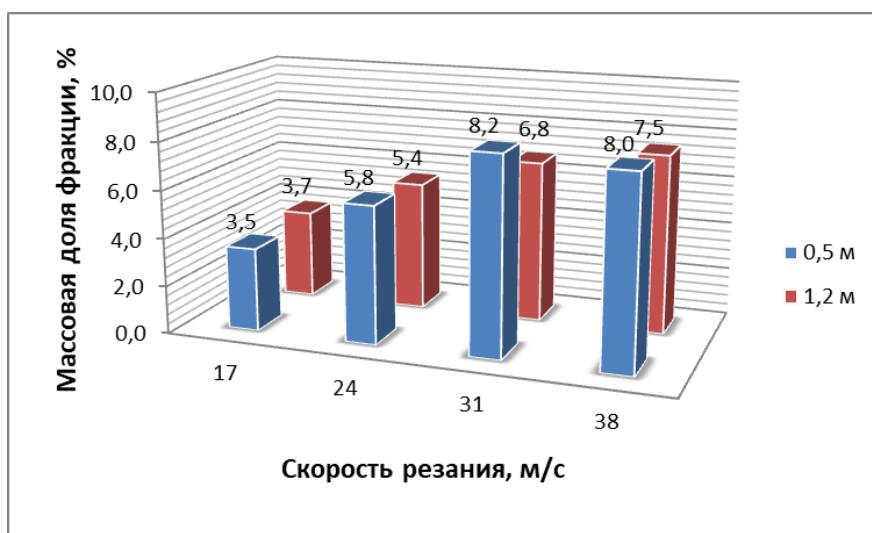


Рисунок 3. Массовая доля мелкой фракции (остаток на сите с отверстиями диаметром 5 мм) в зависимости от скорости резания и длины измельчаемого баланса при верхнем выбросе щепы

Figure 3. The mass content of the pine chips (the residue on the sieve with holes 5 mm in diameter), depending on the cutting speed and the length of the cut pulpwood when the upper way of wood chips evacuation is used

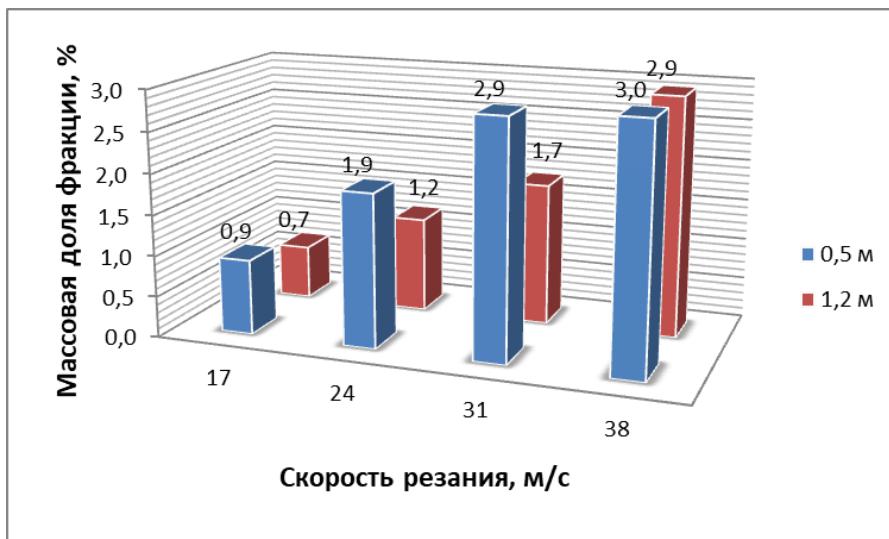


Рисунок 4. Массовая доля отсева (остаток на поддоне анализатора) в зависимости от скорости резания и длины измельчаемого баланса при верхнем выбросе щепы

Figure 4. The mass content of fines (the remainder on the analyzer tray), depending on the cutting speed and the length of the cut pulpwood when the upper way of wood chips evacuation is used

Результаты исследования на экспериментальной установке при горизонтальном выбросе представлены на рисунках 5—8. В целом, при горизонтальном выбросе щепы наблюдаются те же тенденции, что и при верхнем.

Доля крупной фракции в щепе при переработке более длинных образцов меньше на всех скоростях резания, за исключением скорости 38 м/с (см. рисунок 5). При этом необходимо отметить, что при скорости резания 17 м/с (наиболее часто встречающаяся скорость резания у современных рубительных машин) доля крупной фракции значительно возросла по сравнению с верхним выбросом и влияние длины перерабатываемого отрезка более значимо. Особняком в этом ряду стоят результаты, полученные при скорости резания 38 м/с. В этом случае доля крупной фракции при измельчении образцов длиной 1,2 м на 1,4 % больше, чем при измельчении образцов длиной 0,5 м. Вызвано это совместным влиянием двух факторов. Во-первых, при групповой окорке сырья в корообдирочном барабане короткие отрезки подвергаются более интенсивному воздействию нагрузок вдоль и поперёк волокон, чем длинные. Это приводит к большому ослаблению связей между волокнами древесины, в результате в отрезках появляются продольные трещины и, как следствие, более мелкие частицы (в том числе так называемые «иголки»). Во-вторых, при скорости взаимодействия ножа с измельчаемым отрезком бревна, составляющей 38 м/с, последний не успевает изменить своё положение в загрузочном патроне во время измельчения. Эта особенность не противоречит результатам теоретического анализа [2], согласно которым именно изменение положения отрезка бревна в процессе его измельчения в рубительной машине существенно влияет на качество щепы.

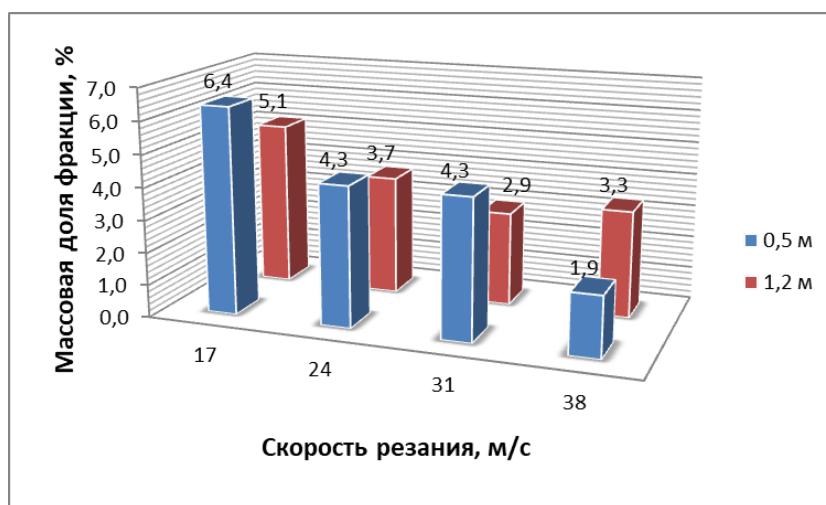


Рисунок 5. Массовая доля крупной фракции (остаток на сите с отверстиями диаметром 30 мм) в зависимости от скорости резания и длины измельчаемого баланса при горизонтальном выбросе щепы

Figure 5. The mass content of oversized chips (the residue on a sieve with holes 30 mm in diameter), depending on the cutting speed and the length of the cut pulpwood when horizontal evacuation of chip is used

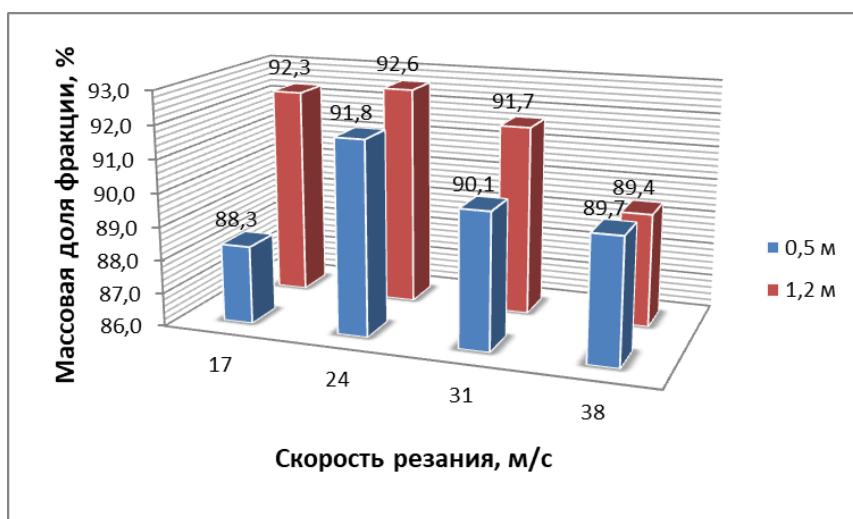


Рисунок 6. Массовая доля кондиционной фракции (сумма остатков на ситах с отверстиями диаметром 20 и 10 мм) в зависимости от скорости резания и длины измельчаемого баланса при горизонтальном выбросе щепы

Figure 6. The mass content of the accepted fraction (the sum of residues on sieves with holes 20 and 10 mm in diameter), depending on the cutting speed and the length of the cut pulpwood when horizontal evacuation of chip is used

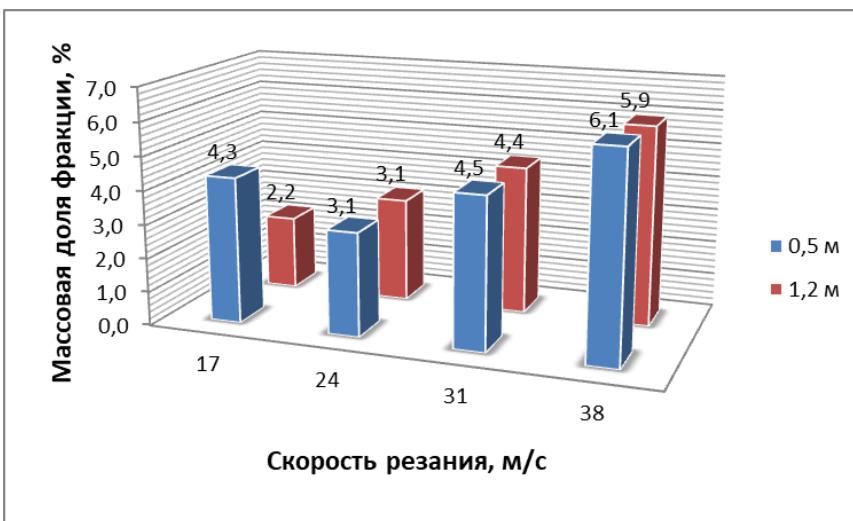


Рисунок 7. Массовая доля мелкой фракции (остаток на сите с отверстиями диаметром 5 мм) в зависимости от скорости резания и длины измельчаемого баланса при горизонтальном выбросе щепы.

Figure 7. The mass content of the pine chips (the residue on the sieve with holes 5 mm in diameter), depending on the cutting speed and the length of the cut pulpwood when horizontal evacuation of chip is used.

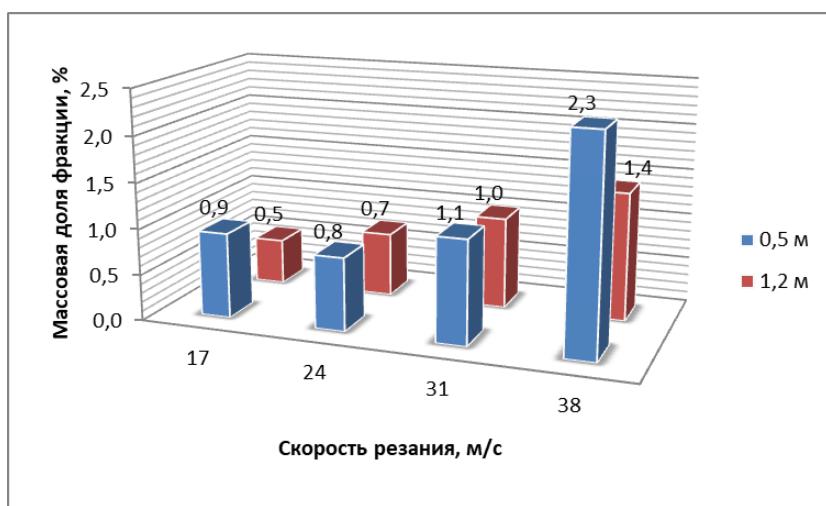


Рисунок 8. Массовая доля отсея (остаток на поддоне анализатора) в зависимости от скорости резания и длины измельчаемого баланса при горизонтальном выбросе щепы

Figure 8. The mass content of fines (the remainder on the analyzer tray), depending on the cutting speed and the length of the cut pulpwood when horizontal evacuation of chip is used

Влияние длины измельчаемого отрезка бревна на долю кондиционной фракции в производимой щепе при горизонтальном выбросе (см. рисунок 6) в большей степени проявилось при скорости резания 17 м/с. В этом случае использование отрезков длиной 1,2 м позволяет получить на 4 % больше кондиционной фракции, чем использование отрезков длиной 0,5 м. Здесь тоже уместно говорить о совместном влиянии двух факторов. Однако отличие состоит в том, что при этой скорости взаимодействия ножа с измельчаемым отрезком происходит изменение ориентации последнего в загрузочном патроне. Следствием этого является образование большого количества крупной и, особенно, мелкой фракций (см. рисунок 7), а также отсея (см. рисунок 8) при измельчении короткого отрезка, значительно разрушенного при окорке в барабане, как говорилось ранее.

В целом, результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что длина перерабатываемого баланса оказывает влияние на фракционный состав щепы при верхнем и нижнем способах выброса щепы. Уменьшение длины баланса в исследованном диапазоне скоростей резания приводит к снижению доли кондиционной фракции в щепе. Это может быть вызвано тем, что, как было отмечено по результатам теоретического исследования, доля древесины концов балансов с уменьшением их длины растёт. Теоретическое исследование проблемы [2] и представленные выше результаты, полученные на экспериментальной установке (см. рисунки 1—8), показали, что в начале рубки балансов и в конце образуется наибольшее количество некондиционных фракций. На это накладывается ещё расслоение древесины на концах коротких отрезков, вызванное

разрушающими нагрузками, возникающими при очистке от коры в корообдирочном барабане [1].

3.2. Результаты промышленного эксперимента

Цель данной части исследования: получить дополнительные данные о влиянии длины измельчаемого отрезка бревна на фракционный состав щепы в условиях производственного эксперимента. Подготовленные к измельчению отрезки брёвен были распределены на группы по критерию доли короткомеров в общем массиве балансов, подаваемых в рубительную машину. Таким образом, было сформировано пять групп: «40» — содержание короткомеров от 38 до 42 %; «45» — содержание короткомеров от 43 до 47 %; «50» — содержание короткомеров от 48 до 52 %; «55» — содержание короткомеров от 53 до 57 %; «60» — содержание короткомеров от 58 до 68 %.

При проведении анализов качества щепы фиксировалось содержание в ней коры и гнили. Результаты показали, что во время проведения эксперимента массовые доли коры и гнили в щепе не превышали 0,2 и 0,5 % соответственно.

Поскольку пробы щепы для определения фракционного состава отбирались круглосуточно (с интервалом 6—9 ч), то на первом этапе полученные данные были проанализированы на предмет корреляции между временем отбора и фракционным составом. Это было сделано ввиду того, что дважды в сутки производится замена ножей рубительной машины. Необходимо было установить, влияло ли в ходе проведённого исследования техническое состояние ножей рубительной машины на фракционный состав щепы. Анализ результатов показал отсутствие значимого влияния времени отбора проб на фракционный состав щепы. Это означает, что замена ножей рубительной машины осуществлялась своевременно. При несвоевременной замене имело бы место периодическое снижение качества щепы на отрезке времени, который предшествовал замене ножей.

Таким образом, исключив фактор влияния технического состояния ножей рубительной машины на качество получаемой щепы, приступили к решению второй задачи исследования. На этом этапе полученные результаты фракционного состава анализировались на предмет выявления корреляции между долей короткомеров в потоке сырья и массовой долей различных фракций в щепе.

Средние значения по группам результатов обработки фракционных анализов щепы, полученных в ходе экспериментального исследования, представлены на рисунках 9—12. Все графики демонстрируют наличие определённой зависимости между содержанием в измельчаемом сырье короткомеров и фракционным составом щепы. При этом доля кондиционной фракции с увеличением содержания в сырье короткомеров уменьшается, а доли крупной и мелких фракций растут. Результаты обработки полученных данных, отражённые на рисунках 9—12, удовлетворительно аппроксимируются с помощью линейных зависимостей.

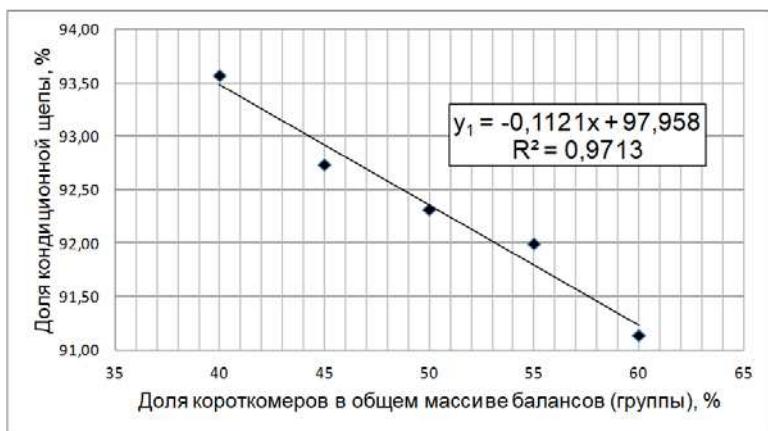


Рисунок 9. Доля (средние значения для групп) кондиционной (y_1) фракции в зависимости от доли короткомеров (x) в сырье

Figure 9. The proportion (average values for groups) of a accept chips (y_1), depending on the proportion of short sections of logs (x) in the raw material

Подставив в уравнение $y_2 = 0,036x + 1,3749$ (рисунок 10) предельно допустимое по ГОСТ значение доли крупной некондиционной щепы $y_2 = 3\%$, получим максимально допустимую для получения щепы марки Ц1 долю короткомеров в общем массиве балансов $x = 45\%$.

Значение массовой доли кондиционной фракции в щепе колебалось от 87,8 до 97,8 % для всех отобранных в ходе исследования проб. Оба экстремальных значения были выявлены в группе «55» по содержанию короткомеров. При сравнении средних групповых значений установлено, что при увеличении доли короткомеров в общем массиве балансов с 40 до 60 % массовая доля нормальной фракции в щепе снижается на 2,5 %.

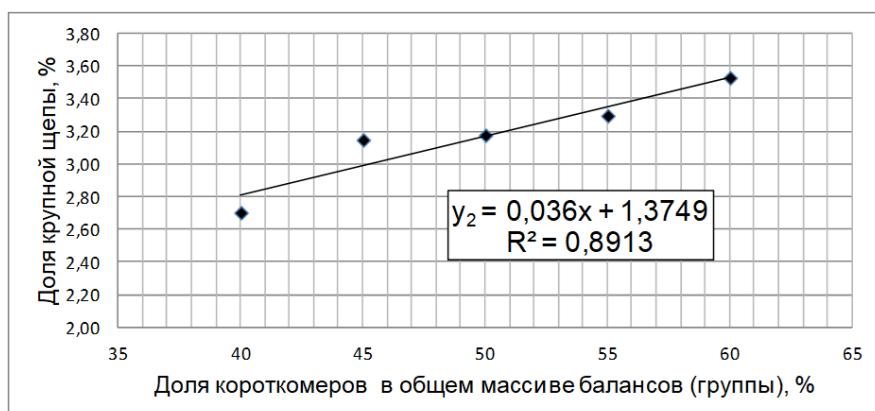


Рисунок 10. Доля (средние значения для групп) крупной фракции (y_2) в зависимости от доли короткомеров (x) в сырье

Figure 10. The proportion (average values for groups) of oversized chips (y_2), depending on the proportion of short sections of logs (x) in the raw material

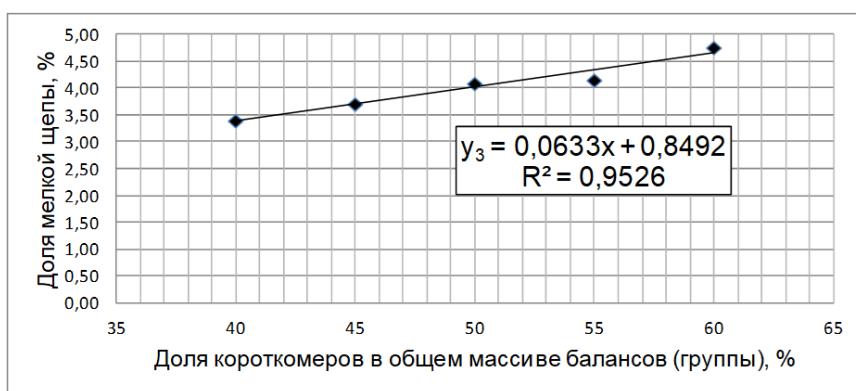


Рисунок 11. Доля (средние значения для групп) мелкой фракции (y_3) в зависимости от доли короткомеров (x) в сырье

Figure 11. The proportion (average values for groups) of a pin chips (y_3), depending on the proportion of short sections of logs (x) in the raw material

Среднее значение массовой доли крупной фракции в щепе по проведённым замерам составило 3,2 %. При этом экстремальные значения были выявлены в группе «50» по содержанию короткомеров, они составили 1,1 и 6,9 %. Сравнение средних групповых значений показывает рост массовой доли крупной фракции в щепе на 0,8 % при увеличении содержания короткомеров в сырье от 40 до 60 %.

Среднее значение массовой доли мелкой фракции в щепе при исследовании диапазона доли короткомеров в сырье от 40 до 60 % составило 4,1 %. Экстремальные значения были выявлены в группе «55» по содержанию короткомеров, они составили 0,5 и 6,4 %. Сравнение средних групповых значений показывает рост массовой доли мелкой фракции в щепе на 1,4 % при увеличении содержания короткомеров в сырье от 40 до 60 %.

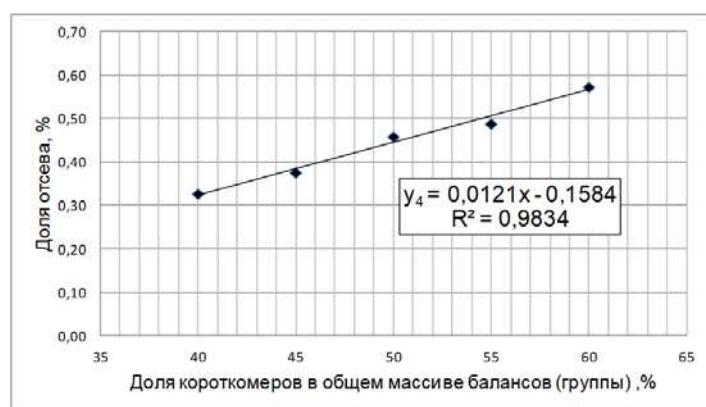


Рисунок 12. Доля (средние значения для групп) отсева (y_4) в зависимости от доли короткомеров (x) в сырье

Figure 12. The proportion (average values for groups) of a fines (y_4), depending on the proportion of short sections of logs (x) in the raw material

При доле короткомеров в сырье в диапазоне от 40 до 60 % среднее значение массовой доли отсева в щепе составило 0,5 %. Экстремальные значения были выявлены в группе «55» по содержанию короткомеров, они составили 0,2 и 1,0 %. Сравнение средних групповых значений показывает рост массовой доли отсева в щепе на 0,3 % при увеличении содержания короткомеров в сырье от 40 до 60 %.

4. Обобщение результатов экспериментов

Ранее уже было отмечено влияние на фракционный состав щепы механических повреждений древесины, как одной из характеристик сырья. Неоднократно подтверждённый опытом эксплуатации анализ этой проблемы показал, что торцы балансов разрушаются под воздействием ударных нагрузок в корообдирочном барабане. Происходит так называемое их «размочаливание». Чем меньше длина перерабатываемого баланса, тем, соответственно, меньше и длина неповреждённой части, а с увеличением длины баланса возрастает длина его неповреждённой средней части. Ранее проведёнными исследованиями установлено, что повреждения при сжатии вдоль волокон распространяются от торцов на длину, примерно равную диаметру баланса [5]. Указанные повреждения приводят к увеличению доли мелких фракций при измельчении торцевых частей балансов в рубительной машине. Стоит отметить, что методика количественной оценки повреждений в виде «размочаливания» торцов, как одного из типов механических повреждений, в настоящее время в известной нам литературе не представлена. Необходимость разработки такой методики объясняется тем, что видимые и скрытые повреждения древесины в процессе её переработки в щепу, как показано в работе [6], оказывают существенное влияние на качество целлюлозы. Вопросы количественной оценки влияния «размочаливания» торцов балансов при их очистке от коры в корообдирочных барабанах, частично затронутые в работах [5], [7], требуют отдельного рассмотрения, выходящего за рамки данной статьи.

Полученные в ходе проведённого исследования результаты косвенным образом подтверждают тот факт, что при групповой очистке от коры в корообдирочном барабане короткомеры подвергаются более сильным механическим повреждениям. Поэтому при производстве щепы провоцируют образование повышенной массовой доли мелкой фракции и отсева. Рост доли крупной фракции подтверждает предположение о том, что короткомеры не всегда правильно ориентируются в зоне измельчения [2]. Рассчитанный на подачу к ножевому диску балансов длиной не менее 0,8 м загрузочный патрон не в состоянии правильно удерживать короткомеры при подаче. Поэтому реалистичной представляется следующая ситуация. Под механическим действием ножей рубительной машины короткомер, имея шесть степеней свободы угловых и линейных перемещений, занимает случайное положение вблизи ножевого диска рубительной машины и вместо поперечно-торцевого резания могут иметь место два других вида измельчения.

Во-первых, скальвание вдоль волокон, когда продольная ось короткомера почти вертикальна и параллельна плоскости ножевого диска. Во-вторых, поперечное резание,

но такое, при котором продольная ось короткомера почти горизонтальна и параллельна плоскости ножевого диска. Нельзя исключать всех промежуточных вариантов измельчения древесины. В итоге в результате измельчения могут появляться частицы некондиционных размеров и формы (фото 7). В частности, это вызывает рост доли крупной фракции в щепе при возрастании доли короткомеров в сырье, подаваемом в рубительную машину. Экспериментально было установлено, что угол среза может составлять 12° , что выходит за интервал $30—60^\circ$, рекомендуемый п. 2.3 ГОСТ 15815-83.

Полученные результаты подтверждают правомерность сделанных ранее предложений о необходимости уменьшения доли короткомеров в общем потоке балансов, поступающих на измельчение в рубительную машину [2]. Полностью исключить появление короткомеров в загрузочном устройстве рубительной машины не представляется возможным при использовании существующего оборудования и принятой технологии. Объясняется это тем, что длина даже стандартного баланса (1,2 м) уменьшается в процессе измельчения в рубительной машине. Тем самым в загрузочном устройстве (патроне) образуется короткомер, зафиксировать который в технологически правильном положении не позволяет конструктивное решение существующей рубительной машины. С целью решения этой проблемы предложен ряд технических подходов [8], [9]. Однако проблема, в целом, остается актуальной и требует продолжения исследований.

Поскольку полностью исключить образование короткомеров в загрузочном устройстве рубительной машины в настоящее время технически невозможно, то представляется целесообразным уменьшить или полностью исключить появление короткомеров в общем потоке балансов до их загрузки в рубительную машину.



Фото 7. Крупная фракция щепы. Частица щепы с углом среза 12° , получившаяся из короткомера (выделена)

Photo 7. Oversized chips. A chip particle with a cut-off angle of 12° , obtained from a short section of log (highlighted)

Для исключения появления короткомеров возможны три подхода:

- применение предварительного сортирования брёвен по длине с учётом расстояния между пилами перед распиловкой на слешере (см. фото 1 и 2);
- изменение количества и (или) расположения пил на слешере;
- применение такой схемы расположения пил на слешере, когда обеспечивается получение остатка длиной не менее выпиливаемых балансов.

Каждый из этих подходов позволит снизить потери не только при производстве щепы в рубительной машине, но и при раскрое брёвен перед подачей в древесно-подготовительный цех (в частности, уменьшится объём опилок).

Перспективы исследования могут быть связаны с использованием устройств анализа изображений непрерывного измерения для определения длины и формы частиц измельчённой древесины с учётом известного опыта применения таких устройств [10]. Кроме того, целесообразно учитывать новые результаты исследований, относящиеся к теме представленного исследования [11—16].

Выводы

С учётом изложенного выше материала исследования можно сделать следующие выводы:

1. Результаты исследования на экспериментальном стенде позволяют сделать вывод о том, что длина перерабатываемого отрезка бревна оказывает влияние на фракционный состав щепы при верхнем и нижнем способах выброса щепы.

2. Уменьшение длины баланса в исследованном диапазоне скоростей резания (17—38 м/с) приводит к снижению доли кондиционной фракции в щепе.

3. Установлена зависимость между долей короткомеров в массиве сырья, подаваемого в рубительную машину, и фракционным составом вырабатываемой щепы. Зависимости массовых долей различных фракций щепы с достаточной для практики точностью могут быть аппроксимированы линейными выражениями.

4. Результаты экспериментального исследования фракционного состава щепы, полученной из отрезков брёвен длиной от 0,10 до 0,8 м, показали, что уменьшение доли короткомеров в общем объёме балансов от 68 до 38 % ведёт к увеличению выхода кондиционной фракции в технологической щепе на 2,5 %, а также к уменьшению долей крупной фракции на 0,8 % и мелкой — на 1,7 %.

5. По результатам производственных экспериментов получена зависимость следующего вида: $y_2 = 0,036x + 1,3749$, позволившая установить предельно допустимую долю короткомеров $x = 45\%$ при массовой доле крупной щепы $y_2 = 3\%$. Таким образом, получение щепы, отвечающей по фракционному составу требованиям к щепе марки Ц1 по ГОСТ 15815-83 возможно в рубительной машине с ножевым диском диаметром 2500 мм, если в подаваемом на измельчение потоке балансов доля отрезков длиной не более 0,8 м не превышает 45 %.

Список литературы

1. Девятникова Л. А., Васильев С. Б., Колесников Г. Н. Влияние технологии раскюя балансов на фракционный состав щепы // Вестник МГУЛ — Лесной вестник. М.: Изд-во МГУЛ, 2012. № 3. С. 120—124.
2. Васильев С. Б., Девятникова Л. А., Колесников Г. Н. Влияние изменения длины баланса, измельчаемого в дисковой рубительной машине, на размеры частиц древесной щепы // Политехнический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). Краснодар: КубГАУ, 2012. № 07 (81). Текст: электронный.
3. Bjurulf A. Chip Geometry. Methods to impact the geometry of market chips // Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, 2006. 43 p. URL: http://diss-epsilon.slu.se/archive/00001251/01/Chip_geometry.pdf. Text. Image: electronic.
4. ГОСТ 15815-83. Щепа технологическая. Технические условия. Введ. 24.08.83. М.: Изд-во стандартов, 1992. 11 с.
5. Девятникова Л. А. Комплекс задач по совершенствованию технологии и оборудования древесно-подготовительного цикла для производства целлюлозы // Леса России в XXI веке: Материалы Пятой междунар. научно-практич. Интернет-конф. СПб.: ЛТА, 2010. С. 151—158.
6. Вальщиков Н. М., Лицман Э. П. Рубительные машины: [монография]. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 96 с.
7. Никонова Ю. В. Обоснование конструктивно-технологических параметров корообдирочных барабанов с применением численного моделирования динамического взаимодействия балансов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Спец.: 05.21.01, 05.13.18. Петрозаводск, 2009. 20 с.
8. Рубцов Ю. В., Коннова Г. В., Рудько С. В. Технология переработки низкокачественной древесины на щепу рубительными машинами в США и России // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2011. Т. 1, № 8. С. 108—114.
9. Twaddle A. A., Watson W. F. Shortwood vs. longwood chipping what impact on chip distribution // Tappi Journal. June, 1992. P. 107—111.
10. Kuptz D., Hartmann H. Evaluation of Fuel Quality, Throughput Rate and Energy Consumption During Non-Industrial Wood Chip Production with Three PTO Driven Chippers // Croatian Journal of Forest Engineering: Časopis za teoriju i praksu šumarskoga inženjerstva. 2022. Vol. 43, no. 1. P. 109—122. URL: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2022.1191>. Text. Image: electronic.
11. Reduction in Operating Costs and Environmental Impact Consisting in the Modernization of the Low-Power Cylindrical Wood Chipper Power Unit by Using Alternative Fuel / Ł. Warguła, M. Kukla, P. Krawiec, B. Wieczorek // Energies. 2020. 13. 2995. URL: <https://doi.org/10.3390/en13112995>. Text. Image: electronic.
12. Sustainability Assessment of Alternative Strip Clear Cutting Operations for Wood Chip Production in Renaturalization Management of Pine Stands / J. Schweier, B. Blagojević, R. Venanzi, F. Latterini, R. Picchio // Energies. 2019. 12. 3306. URL: <https://doi.org/10.3390/en12173306>. Text. Image: electronic.
13. Classification of Wood Chips Using Electrical Impedance Spectroscopy and Machine Learning / M. Tiitta, V. Tiitta, J. Heikkinen, R. Lappalainen, L. Tomppo // Sensors. 2020. 20. 1076. URL: <https://doi.org/10.3390/s20041076>. Text. Image: electronic.
14. Effect of Thermal Treatment of Birch Wood by Saturated Water Vapor on Granulometric Composition of Chips from Sawing and Milling Processes from the Point of View of Its

Processing to Composites / R. Kminiak, K. A. Orlowski, L. Dzurenda, D. Chuchala, A. Banski // Appl. Sci. 2020. 10. 7545. URL: <https://doi.org/10.3390/app10217545>. Text. Image: electronic.

15. Impact of Number of Operators and Distance to Branch Piles on Woodchipper Operation / Ł. Warguła, M. Kukla, P. Krawiec, B. Wieczorek // Forests. 2020. 11. 598. URL: <https://doi.org/10.3390/f11050598>. Text. Image: electronic.
16. Rojcewicz K., Oksiuta Z. A Vertical Fountain Dryer Adjusted for Sawdust and Wood Chips Drying // Processes. 2023. 11. 430. URL: <https://doi.org/10.3390/pr11020430>. Text. Image: electronic.

References

1. Devyatnikova L. A., Vasilyev S. B., Kolesnikov G. N. Pulp wood re-sawing process influence on wood chip quality. *Forestry Bulletin*. Moskow, MGUL Publishing House, 2012, no. 3, pp. 120—124. (In Russ.)
2. Devyatnikova L. A., Vasilyev S. B., Kolesnikov G. N. Influence of pulp logs length on the size distribution of wooden chips manufactured by disk chipper. *Polythematic online electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University (KubGAU Scientific Journal)*. Krasnodar, KubGAU, 2012, no. 07 (81). (In Russ.)
3. Bjurulf A. Chip Geometry. *Methods to impact the geometry of market chips. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences*. Uppsala, 2006. 43 p. Available at: http://diss-epsilon.slu.se/archive/00001251/01/Chip_geometry.pdf. Text. Image: electronic.
4. GOST 15815-83. Technological chips. Technical conditions. Introduction. 24.08.83. Moscow, Publishing House of Standards, 1992. 11 p. (In Russ.)
5. Devyatnikova L. A. A set of tasks for improving the technology and equipment of the wood-preparatory cycle for pulp production. *Forests of Russia in the XXI century: Materials of the fifth international scientific and practical Internet conference*. St. Petersburg, LTA, 2010, pp. 151—158. (In Russ.)
6. Valshchikov N. M., Litsman E. P. *Chippers: [monograph]*. Moscow, Forest industry, 1980. 96 p. (In Russ.)
7. Nikanova Yu. V. *Substantiation of structural and technological parameters of debarking drums using numerical simulation of dynamic interaction of balances: Abstract. dis. ... candidate of Technical Sciences, spec. 05.21.01, 05.13.18*. Petrozavodsk, 2009. 20 p. (In Russ.)
8. Rubtsov Yu. V., Kononova G. V., Rudko S. V. Technology of processing low-quality wood into chips by chopping machines in the USA and Russia. *Scientific notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University*, 2011, vol. 1, no. 8, pp. 108—114. (In Russ.)
9. Twaddle A. A., Watson W. F. Shortwood vs. longwood chipping what impact on chip distribution. *Tappi Journal*. June, 1992, pp. 107—111.
10. Kuptz D., Hartmann H. Evaluation of Fuel Quality, Throughput Rate and Energy Consumption During Non-Industrial Wood Chip Production with Three PTO Driven Chippers. *Croatian Journal of Forest Engineering: Časopis za teoriju i praksu šumarskoga inženjerstva*, 2022, vol. 43, no. 1, pp. 109—122. Available at: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2022.1191> Text. Image: electronic.
11. Warguła Ł., Kukla M., Krawiec P., Wieczorek B. Reduction in Operating Costs and Environmental Impact Consisting in the Modernization of the Low-Power Cylindrical Wood Chipper Power Unit by Using Alternative Fuel. *Energies*, 2020, 13, 2995. Available at: <https://doi.org/10.3390/en13112995>. Text. Image: electronic.
12. Schweier J., Blagojević B., Venanzi R., Latterini F., Picchio R. Sustainability Assessment of Alternative Strip Clear Cutting Operations for Wood Chip Production in Renaturalization

Management of Pine Stands. *Energies*, 2019, 12, 3306. Available at: <https://doi.org/10.3390/en12173306>. Text. Image: electronic.

13. Tiitta M., Tiitta V., Heikkinen J., Lappalainen R., Tomppo L. Classification of Wood Chips Using Electrical Impedance Spectroscopy and Machine Learning. *Sensors*, 2020, 20, 1076. Available at: <https://doi.org/10.3390/s20041076>. Text. Image: electronic.
14. Kminiak R., Orlowski K. A., Dzurenda L., Chuchala D., Banski A. Effect of Thermal Treatment of Birch Wood by Saturated Water Vapor on Granulometric Composition of Chips from Sawing and Milling Processes from the Point of View of Its Processing to Composites. *Appl. Sci.*, 2020, 10, 7545. Available at: <https://doi.org/10.3390/app10217545>. Text. Image: electronic.
15. Warguła Ł., Kukla M., Krawiec P., Wieczorek B. Impact of Number of Operators and Distance to Branch Piles on Woodchipper Operation. *Forests*, 2020, 11, 598. Available at: <https://doi.org/10.3390/f11050598>. Text. Image: electronic.
16. Rojcewicz K., Oksiuta Z. A Vertical Fountain Dryer Adjusted for Sawdust and Wood Chips Drying. *Processes*, 2023, 11, 430. Available at: <https://doi.org/10.3390/pr11020430>. Text. Image: electronic.

© Васильев С. Б., Девятникова Л. А., Колесников Г. Н., 2023

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6823

УДК 630 * 319

Статья

Повышение экологической безопасности трассы Р-21 «Кола» как центрального элемента лесной инфраструктуры Карелии

Графова Елена Олеговна

*кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет
(Российская Федерация), grafova.elena.karelia@gmail.com*

Степанов Артем Валерьевич

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

Сюнёв Владимир Сергеевич

*доктор технических наук, профессор, Петрозаводский государственный университет
(Российская Федерация), siounev@petrsu.ru*

Катаров Василий Кузьмич

*кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет
(Российская Федерация), vkatarov@petrsu.ru*

Получена: 27 января 2023 / Принята: 27 февраля 2023 / Опубликована: 10 марта 2023

Аннотация: В статье рассматривается проблема загрязнения водных объектов поверхностными дождовыми и талыми стоками, выносящими с дорожного полотна взвешенные вещества и нефтепродукты. Особенно это актуально для транспортных магистралей, связывающих различные регионы Российской Федерации. Авторами показано, что типичным представителем дорог этой группы является расположенная в Республике Карелия автодорога Р-21 «Кола». Анализ условий эксплуатации этой транспортной магистралей показал, что она не только выполняет функцию транзитного коридора для других регионов России, но и представляет собой ключевой элемент, связывающий в единую логистическую цепь предприятия лесного комплекса всего Северо-Западного федерального округа. Для снижения негативного воздействия на прилежащие к трассе водные объекты предложено организовать отведение поверхностных вод с дорожного полотна в прикормочные лотки. Далее эти воды планируется отводить за пределы откосов дорожной насыпи с последующей их очисткой.

в самотечных гидротехнических сооружениях перед окончательным сбросом в водные объекты. Использование авторами геоинформационных систем позволило установить границы водных объектов, пересекаемых автомагистралью Р-21 «Кола». По результатам исследования определены количество и размеры водоохраных зон. Анализ полученных результатов показал, что водоохраные зоны в среднем встречаются каждый второй километр. Этого количества недостаточно для обеспечения экологической безопасности прилегающих территорий. В работе обоснована необходимость организации дополнительных комплексов отведения и очистки поверхностных вод на протяжении всей автомагистрали. Авторами определён расход дождевых и талых вод с существующих участков дороги в пределах водоохраных зон, что позволило предложить метод унификации систем водоотведения с дорожного полотна. Определена целесообразность установки водоотводных лотков через каждые 50—200 м. Показано, что это мероприятие обеспечит отведение и очистку поверхностных стоков с необходимой интенсивностью 0,6—1,9 л/с. Увеличение протяжённости участка водосбора приведёт к неконтролируемому переполнению лотков и переливу загрязнённых вод на откос дороги без очистки, что негативно влияет на экологическое состояние придорожных территорий и прилегающих водных объектов.

Ключевые слова: транспорт; интенсивность движения; водные объекты; зона санитарной охраны; сток с дороги

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6823

Article

Increasing the environmental safety of the R-21 "Kola" road as a central element of the Karelian forest infrastructure

Elena Grafova

*Ph. D. in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),
grafova.elena.karelia@gmail.com*

Artyom Stepanov

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

Vladimir Syunev

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

Vasiliy Katarov

*Ph. D. in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),
vkatarov@petrsu.ru*

Received: 27 January 2023 / Accepted: 27 February 2023 / Published: 10 March 2023

Abstract: The article deals with the problem of water bodies' pollution with surface rain and melts runoffs containing suspended solids and oil products from the roadway. The authors show that the R-21 "Kola" road located in the Republic of Karelia is a typical representative of the roads of this group. An analysis of the operating conditions of this transport highway showed that it not only serves as a transit corridor for other regions of Russia, but also represents a key element that links the enterprises of the forestry complex of the entire northwestern federal district into a single logistics chain. To reduce the negative impact on the water bodies adjacent to the highway the authors proposed wastewater disposal management to remove surface waters to gutters. These waters will be disposed down road slopes with their subsequent treatment in gravity hydraulic structures before final discharge into water bodies. The authors established the boundaries of water bodies crossed by the R-21 "Kola" highway by using geographic information systems. The number and size of water protection zones were determined and it was shown that these zones occurred every second kilometer on average. This number is not enough to ensure the environmental safety of the surrounding areas. The paper substantiates the need to organize additional complexes for surface waters

diversion and treatment throughout the entire highway. The calculations performed by the authors to determine the flow of rain and melt water from existing sections of the road within the water protection zones allowed them to propose a method for drainage systems unification. The expediency of installing drainage gutters every 50–200 m was determined. This measure will ensure the diversion and treatment of surface runoffs with the required intensity of 0,6–1,9 l / s. An increase of the runoff collecting area might lead to uncontrolled overflow of gutters and overflow of polluted water onto the road slope without treatment thus negatively affecting the ecological state of roadside areas and adjacent water bodies.

Keywords: transport; traffic intensity; water bodies; sanitary protection zone; runoff from the road

1. Введение

Республика Карелия расположена на Северо-Западе Российской Федерации и является транспортным коридором, соединяющим Мурманскую область с Ленинградской, Вологодской и Архангельской областями. На сегодняшний день в Республике Карелия насчитывается более 19 тыс. различных предприятий. Основными сферами промышленности в республике являются следующие отрасли: лесозаготовительная, деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная — 41,2 %, чёрная металлургия — 18,0 %, электроэнергетика — 14,8 %, машиностроение и металлообработка, цветная металлургия, пищевая промышленность — 5—9 % [1]. Таким образом, именно лесная промышленность является неоспоримым лидером в регионе. На долю республики приходится 23 % производимой в стране бумаги, 9 % — целлюлозы, 7,3 % — деловой древесины, 4 % — пиломатериалов, около 60 % — бумажных мешков [2]. Экономика Карелии, занимающей приграничное положение, долгие годы была ориентирована на экспорт. Более 50 % производимой продукции (а по ряду отраслей — до 100 %) шло на экспорт. Треть внешнего оборота республики направлялась в Финляндию. В современных реалиях ряд предприятий либо уже переориентировались, либо активно переходят на рынки Востока и Азии, где карельский производитель оказался в явном преимуществе, а именно: усовершенствованные под высокие европейские производства технологии деревообработки, а также преимущества качества северной древесины по плотности. Основными промышленными центрами являются: Петрозаводск, Кондопога, Сегежа, Костомукша, Питкяранта. На территории республики находятся три предприятия целлюлозно-бумажной промышленности, в т. ч. АО «Сегежский ЦБК» — объём потребления сырья составляет 1,6 млн м³, ОАО «Кондопога» — 1,4 млн м³, ООО «РК-Гранд» — 0,4 млн м³. В деревообрабатывающей и плитной промышленности насчитывается более 10 предприятий, выпускающих широкий спектр продукции деревообработки [пиломатериалы, ориентированно-стружечные плиты (далее — ОСП), топливные гранулы, древесно-стружечные плиты (далее — ДСП), домокомплекты и другие виды продукции]. В последние годы введены новые мощности по лесопилению, в т. ч. ООО «Соломенский лесозавод» — до 300 тыс. м³ пиломатериалов и ООО «Русский Лесной Альянс» — до 50 тыс. м³, по производству ориентированно-стружечных плит построен современный завод ООО ДОК «Калевала» мощностью 300 тыс. м³. Создание новых производств привело к увеличению объёмов переработки древесины на 1 млн м³ в год.

Анализ структуры лесных насаждений региона по группам возраста по лесам, расположенным на землях лесного фонда, составляет: молодняки — 34,9 %, средневозрастные — 24,5 %, приспевающие — 7,4 %, спелые и перестойные — 33,2 %. В структуре лесных насаждений по группам древесных пород хвойные породы составляют 88 %, лиственные породы — 12 %. По целевому назначению площадь лесов распределяется на эксплуатационные леса — 7429,3 тыс. га и защитные леса — 2064,8 тыс. га.

Эксплуатационный запас спелых и перестойных насаждений по лесам на землях лесного фонда составляет 288596 тыс. м³, из которых хвойные — 254698 тыс. м³ (88 %) и мягколиственные — 33808 тыс. м³ (12 %). По основным породам: ель — 103502 тыс. м³ (36 %), сосна — 151193 тыс. м³ (52 %), берёза — 28516 тыс. м³ (10 %), осина — 4914 тыс. м³ (2 %). Средний объём хлыста в эксплуатационных насаждениях составляет 0,198 м³ и распределяется по лесничествам — от 0,29 м³ в Питкярантском лесничестве до 0,134 м³ в Сосновецком лесничестве. Вместе с тем в последние годы на обеспеченной лесными ресурсами территории обострились проблемы сырьевого снабжения ведущих лесоперерабатывающих предприятий. Дефицит древесного сырья в Республике Карелия оценивается в объёме 2,0—2,1 млн м³, который покрывается завозом сырья из Вологодской и Архангельской областей. Несмотря на выгодное географическое положение, одной из основных проблем, сдерживающих развитие лесного комплекса Республики Карелия, является низкая степень обеспеченности транспортной инфраструктурой. Недостаточно развитая дорожно-транспортная инфраструктура ограничивает возможности более полного освоения эксплуатационных лесов и снижает экономическую доступность лесных ресурсов внутри региона [3]. Транспортная инфраструктура является неотъемлемой частью лесопромышленного комплекса, причём необходимо принимать во внимание как лесные дороги, так и дороги общего пользования. В настоящее время уже разработаны механизмы улучшения транспортной инфраструктуры. Этот вопрос актуален, в особенности, для арктических регионов [4].

В Карелии представлены все виды транспорта: железнодорожный, автомобильный, внутренний водный и морской, воздушный и трубопроводный. Большая часть транспортных услуг приходится на железнодорожный и автомобильный транспорт, меньшая — на водный и воздушный транспорт. По территории республики проходят два автомобильных коридора, обеспечивающих транзит грузов из южных и центральных регионов России в Мурманскую область и из восточных регионов в Финляндию: Мурманск — Санкт-Петербург — Новгород — Тверь — Москва — Тула — Воронеж — Ростов-на-Дону — Краснодар — Новороссийск — Сочи и Санкт-Петербург — Каргополь — Котлас — Сыктывкар — Кудымкар — Пермь с подходами в Пудож — Медвежьегорск — Костомушка — граница с Финляндией. Подобные транспортные коридоры встречаются и в других регионах России, например Якутии [5], и зарубежных странах [12], [13], [14]. Все автомобильные дороги Карелии в зависимости от вида собственности делятся на федеральные дороги, территориальные автомобильные дороги и ведомственные дороги. Общая протяжённость федеральных дорог на территории республики составляет 1758 км, или 13,6 % от общей протяжённости автодорог Карелии [6]. Исследователи [7] оценили потребность в дорогах общего пользования по СЗФО и выявили, что на сегодняшний день обеспеченность ими составляет около 27 %, поэтому необходимо дополнительно обеспечить около 19 тыс. км. Существующие лесные магистрали составляют только 29 % от требуемой протяжённости 106 тыс. км. Существующая лесная сеть веток по протяжённости составляет

36 % от требуемой. По расчётом, для полного транспортного освоения лесов Карелии необходимо дополнительное строительство 8,3 тыс. км таких дорог.

Вследствие протяжённости территории республики с севера на юг исторически сформировалась дорожная сеть моноподиального типа с образованием центрального коридора — автодороги Р-21 «Кола». Таким образом, целью настоящих исследований является обоснование использования трассы Р-21 «Кола» в качестве основного элемента лесопромышленной транспортной инфраструктуры Республики Карелия.

Оценивая интенсивность движения по центральной трассе Карелии, следует учитывать воздействие транспорта на состояние и устойчивость дорожных конструкций. Одним из разрушающих факторов является воздействие свободной воды, попадающей в конструктивные слои дорожной одежды при давлении колёсных пар транспортных средств. Источником поступающей воды, с учётом правильного выполнения строительных работ и мероприятий по отведению дренажных вод, являются дождевые осадки и талые воды, которые также способствуют размыву откосов дорожной насыпи и возникновению эрозионных и оползневых процессов. В связи с этим особое внимание при устройстве дорожного полотна следует уделять формированию водоотводных каналов и выпусков. С учётом требований безопасности дорожного движения и уклонов поверхности дороги следует обеспечить надёжное отведение воды в прикромочные лотки и своевременный сброс по отводным канавам к основанию откоса на рельеф или в водные объекты.

Дождевые и талые воды смывают с поверхностей дорожного полотна растворимые и нерастворимые примеси, а также частицы пыли и газа, находящиеся в приземных слоях атмосферы. Отводимые воды с дорог, как правило, загрязнены и содержат взвешенные вещества, являющиеся продуктами разрушения дорожного покрытия, истирания шин, частицы грунта с колёс автотранспорта, накапливающиеся за межуборочный период, пыль, продукты эрозии откосов дорожного полотна и придорожных кюветов. В особенности это касается лесовозного транспорта, выезжающего на дороги общего пользования с примыкающими к ним лесных дорог [8]. Также отводимая с полотна вода содержит нефтепродукты, образующиеся от розливов топлива при заправке и дозаправке, утечек антифриза, отработанные моторные масла и прочие углеводороды от транспортных средств. Отводимые загрязнения формируются на всех участках автодороги, но только воды, которые могут попасть в водоёмы, представляют особую опасность и должны подвергаться очистке [5]. Согласно Водному кодексу РФ, в водные объекты запрещается сбрасывать воды, не подвергшиеся очистке и обезвреживанию при проведении строительных работ в водоохраных зонах водных объектов и в границах водно-болотных угодий. Таким образом, в качестве второстепенной задачи проводится оценка выборки расчётных расходов отводимых с дорог поверхностных вод для участков трассы, пересекающих водоохраные зоны, с целью последующего подбора сооружений для очистки этого стока и минимизации негативного воздействия на окружающую среду.

2. Материалы и методы

Автомобильная дорога Р-21 «Кола» имеет протяжённость с юга на север Карелии, вдоль Ладожского и Онежского озёр, а также вдоль берега Белого моря и занимает особое место среди других дорог республики. Она концентрирует основные транспортные потоки региона. Так, например, это единственная дорога, соединяющая Мурманскую область с остальной частью России. Практически все крупные города Республики Карелия и производственные предприятия расположены в непосредственной близости от неё. Древоперерабатывающие предприятия в Сегеже и Кондопоге, в силу их огромного потребления древесины, также нуждаются в дополнительном сырье из соседних регионов, таких как Архангельская и Вологодская области, и этот объём также будет доставлен до производства по трассе «Кола» (рисунок 1).



Рисунок 1. Географическое положение автомобильной дороги Р-21 «Кола» и прилегающие региональные дороги

Figure 1. Geographical location of the R-21 «Kola» highway and adjacent regional roads

Для оценки интенсивности движения транспорта по дороге Р-21 «Кола» на основании данных 14 постов контроля проведён расчёт суточной среднегодовой интенсивности движения, который рассчитан прямым подсчётом всего проезжающего транспорта через пункт видеонаблюдения, где также проведена идентификация типа транспорта. Расчёт суточной среднегодовой интенсивности осуществляется по формуле

$$N_{\text{сут}} = \frac{\sum_{365}^1 24 N_u}{365}, \quad (1)$$

где N_u — часовая интенсивность движения.

Полученные данные распределены по районам, грузоподъёмности, числу полос движения и сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Состав и интенсивность движения по автомобильной дороге Р-21 «Кола»

Table 1. The composition and intensity of traffic on the highway R-21 «Kola»

№	Адрес пункта учёта, км	Число полос движения	Среднегодовая суточная интенсивность движения, авт./сут.							Итого по всем типам	
			Лег-ковые	Авто-бусы	Грузовые и автопоезда						
					в т. ч. грузоподъёмностью, т						
					до 5 т	от 5 до 12 т	от 12 до 20 т	свыше 20 т			
Олонецкий район											
1	269 + 700	4	1875	0	169	244	825	204	3317		
2	313 + 136	2	2517	17	205	256	961	49	4005		
Пряжинский район											
3	383 + 530	3	4289	21	471	308	907	251	6247		
Прионежский район											
4	403 + 130	2	4653	0	294	373	1002	201	6523		
5	419 + 010	2	8228	56	407	406	1043	201	10341		
6	436 + 394	2	9610	0	427	560	800	393	11790		
Кондопожский район											
7	463 + 010	2	6215	49	313	345	749	245	7916		
8	493 + 740	2	3365	34	217	253	732	80	4681		
Медвежьегорский район											
9	607 + 545	3	2499	0	153	204	568	150	3574		
Сегежский район											
10	721 + 000	4	2295	12	183	239	810	110	3649		
Муезерский район											
11	753 + 950	2	1782	0	732	301	368	35	3228		
Беломорский район											
12	796 + 880	2	1424	0	109	134	562	25	2254		
Кемский район											
13	855 + 800	2	1338	0	105	155	531	95	2224		
Лоухский район											
14	1009 + 505	2	1041	0	180	152	458	110	1941		

Проведён прямой анализ интенсивности движения в зависимости от района размещения пунктов контроля. Для оценки автотрасса разбита на условные участки по районам, учтена площадь районов, по которым происходит трансфер к участкам лесозаготовок. Поскольку не все районы имеют прямой выход на автомагистраль Р-21 «Кола», площадь удалённых

районов суммировалась с транзитным районом. Обеспеченность районов региона транспортными путями оценивается коэффициентом Энгеля, рассчитываемым по формуле

$$K = \frac{L}{\sqrt{S \cdot H}}, \quad (2)$$

где L — протяжённость дорог в регионе, км; S — площадь территории региона, тыс. га; H — численность населения, тыс. чел.

Полученные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2. Дополнительные факторы оценки интенсивности движения по автодороге Р-21 «Кола»

Table 2. Additional factors for assessing traffic intensity on the «Kola» R-21 highway

№ п/п	Наименование района, обеспечиваемого транспортной магистралью Р-21 «Кола»	Площадь района, тыс. га	Коэффи- циент Энгеля	Интен- сивность движения авт./сут., более 20 т	Протя- жён- ность участка дороги	Коли- чество водоох- ранных зон, шт.	Пло- щадь вод- ных объек- тов, тыс. га
1	Лоухский	2124,3	0,068	110	141	140	250
2	Кемский и Калевальский	2094,4	0,099	95	81	38	243
3	Беломорский	1254,1	0,085	25	80	56	87
4	Сегежский и Муезерский	2667,2	0,072	110	118	74	394
5	Медвежьегорский и Пудожский	2341,8	0,106	150	43	27	304
6	Кондопожский	555,6	0,104	245	151	28	17
7	Прионежский и Суоярвский	1720,4	0,096	393	55	2	164
8	Пряжинский, Сортавальский и Лахденпохский	899,9	0,120	251	25	7	45
9	Олонецкий	350,9	0,141	204	116	20	7

Для определения расчётных расходов поверхностных дождевых и талых вод в пределах водоохранных зон автодороги Р-21 «Кола» в ГИС-системе проанализирована карта Республики Карелия. На местах пересечения автотрассы с водными объектами, включая болотные угодья, определены количество, ширина водоохранных зон, площади участков автодорог, с которых необходимо осуществить организованное отведение поверхностных вод. Расчётные расходы дождевых и талых вод q_r определены по методу предельных интенсивностей [10]:

$$q_r = \frac{1}{6} \frac{A\varphi}{t_r^n}, \quad (3)$$

где A — параметр, равный максимальной интенсивности дождя продолжительностью 1 мин при принятом периоде однократного превышения расчётной интенсивности дождя, мм/мин.; φ — коэффициент стока дождевых вод, учитывающий тип покрытия; t_r — расчётная продолжительность протекания дождевых вод до рассчитываемого сечения, мин; n — показатель степени, характеризующий изменение расчётной интенсивности дождя по времени. Для расчёта принята схема сбора потока воды с участка, представленная на рисунке 2.

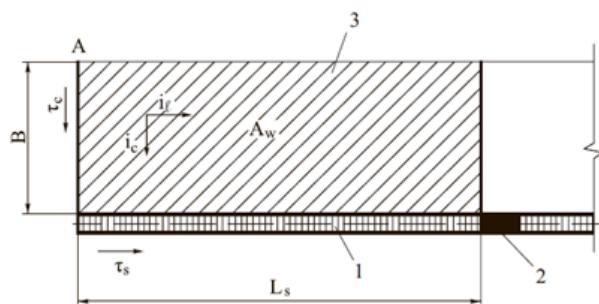


Рисунок 2. Схема распределения стока до расчётного створа: A — наиболее удалённая точка водосбора; B — ширина полотна; 1 — придорожный лоток; 2 — выпускной створ; 3 — водосборная площадь; L_s — расстояние до отметки переполнения лотка

Figure 2. Flow distribution diagram to the design site: A – the most remote watershed point; B – width of the roadbed; 1 – roadside gutter; 2 – outlet section; 3 – catchment area; L_s – distance to the gutter overflow elevation.

Соотношение продольных уклонов лотка i_l и поперечных уклонов i_c покрытий, расчётный уклон и длина склона приняты по линии наибольшего ската, определённого по данным топографии участков дороги. Модель лотка принята треугольной формы (рисунок 3).

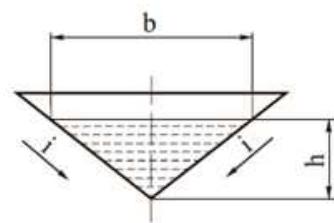


Рисунок 3. Форма профиля придорожного лотка: b — ширина потока воды в лотке; i — поперечный уклон стенок лотка; h — глубина потока воды в лотке

Figure 3. Roadside Gutter Profile Shape: b – the width of the water flow in the gutter; i – transverse slope of the walls of the gutter; h – depth of water flow in the gutter

По результатам расчётов сформирована выборка из 835 участков водосбора различной интенсивности. Для оценки выборки проведён дисперсионный анализ. Для наглядности получения результатов построена гистограмма относительных частот (см. рисунок 6).

3. Результаты

3.1. Оценка транспортной инфраструктуры Республики Карелия

Территориальные автомобильные дороги являются собственностью Республики Карелия и находятся в оперативном управлении Комитета по строительству, эксплуатации и содержанию автомобильных дорог РК. Протяжённость данной категории дорог 6080 км, или 47 % протяжённости автомобильного сообщения республики. Ведомственные дороги, принадлежащие предприятиям различных организационных форм, составляют 5097 км, или 39,4 % всех дорог республики. Распределение принадлежности дорог Карелии представлено на рисунке 4.

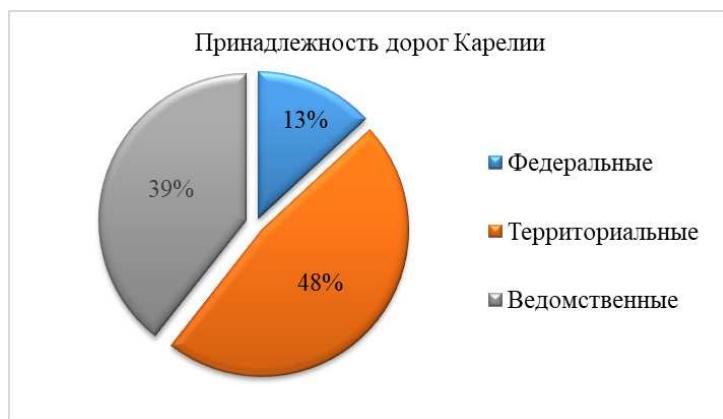


Рисунок 4. Принадлежность дорог Карелии

Figure 4. Roads of Karelia affiliation

Большая часть анализируемых федеральных дорог представлены усовершенствованным (асфальтобетонным) покрытием. Дороги регионального значения по типам покрытия представлены следующим образом:

- с усовершенствованным (асфальтобетонным) покрытием — 1747 км;
- с песчано-гравийно-щебёночным покрытием — 3010 км;
- без покрытия (грнтовые) — 1323 км.

Ведомственные дороги в большинстве своём принадлежат лесной отрасли и представляют собой дороги с грнтовым покрытием. Таким образом, с учётом всех форм собственности протяжённость дорог с асфальтобетонным покрытием составляет 3505 км (27,1 %), песчано-гравийно-щебёночным покрытием — 3010 км (23,27 %), без покрытия (грнтовые) — 6420 км (49,63 %).

Интенсивность движения в Республике Карелия колеблется в пределах от 1000 до 2000 авт./сут. (рисунок 5) за счёт межрегиональных и межрайонных транспортных связей.

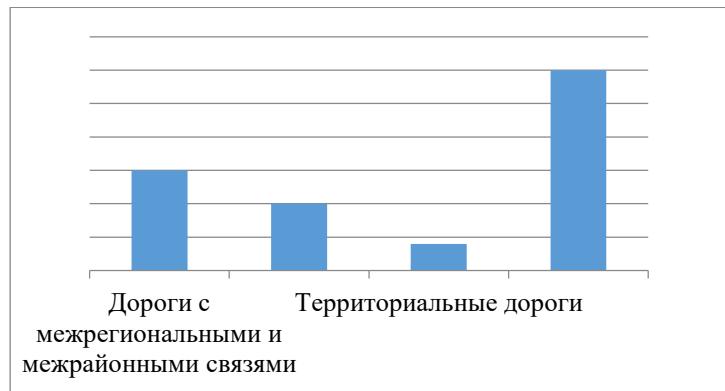


Рисунок 5. Средняя интенсивность движения по дорогам Карелии, авт./сут.

Figure 5. Average intensity of traffic on the roads of Karelia, cars/day

При определении плотности дорог на единицу площади выявляется следующая закономерность: в северной части территории это 1,5 км/1000 га, в центральной части — 2 км/1000 га и в южной части — 4 км/1000 га. Оценка обеспеченности дорогами населения и промышленности, в особенности лесной отрасли, находится на достаточно низком уровне. При сравнении полученных данных с показателями по Московской и Ленинградской областям по критерию Энгеля, что составило 0,67 и 0,71 соответственно [11], уровень обеспеченности автодорогами районов Карелии составляет 0,068—0,141.

3.2. Оценка расходов вод, отводимых с дорожного полотна автотрассы Р-21 «Кола»

На основе расчётных расходов отведения поверхностных вод с дорожного покрытия в пределах водоохранных зон проведён дискретный анализ по частотам встречаемости полученных расходов по типам интенсивности водоотведения, представленных в таблице 3.

Таблица 3. Дискретный статистический ряд расчётных расходов поверхностных вод с участков водоохранных зон автодороги Р-21 «Кола»

Table 3. Discrete statistical series of estimated surface water flows from sections of water protection zones of the «Kola» R-21 highway

Наименование	Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8
Вариации расходов, л/с	X_i	0,6	1,9	2,5	3	4	5	6	8
Повторяемость	n_i	203	403	17	119	23	29	29	12
Относительные частоты	p_i	0,24	0,48	0,02	0,14	0,03	0,03	0,03	0,01

Для оценки выборки проведён её дисперсионный анализ. Для наглядности получения результатов построена гистограмма относительных частот (рисунок 6).



Рисунок 6. Средняя интенсивность движения по дорогам Карелии, авт./сут.

Figure 6. Average intensity of traffic on the roads of Karelia, cars/day

Наиболее высокая частота встречаемости на рассматриваемых участках соответствует расходу 1,9 л/с. Доверительному диапазону частот соответствует интервал 0,6—1,9 л/с. Средняя длина участка составляет 50—200 м.

4. Обсуждение и заключение

Автомобильная сеть дорог Республики Карелия представлена дорогами моноподиального типа с образованием центрального коридора — автодороги Р-21 «Кола». Плотность дорог с севера на юг увеличивается при показателях 1,5—4 км/1000 га.

Автодороги, обеспечивающие широтные связи и выход к границе с Финляндией, соответствуют интенсивности движения до 3000 авт./сут. На автомобильных дорогах, обслуживающих транспортные связи в межрайонном и внутрирайонном сообщении, интенсивность движения составляет 500—1500 авт./сут. На остальной сети территориальных дорог, обеспечивающих перевозки грузов и пассажиров преимущественно во внутрирайонном сообщении, размеры транспортных потоков не превышают 300—500 авт./сут.

Критерий Энгеля составляет 0,068—0,141, что демонстрирует низкую обеспеченность районов Карелии дорогами. Количество водоохраных зон составляет 392, что при протяжённости автомагистрали Р-21 «Кола» 810 км свидетельствует о том, что в среднем водоохраные зоны по трассе встречаются каждый второй километр, а это подтверждает необходимость отведения и очистки поверхностных вод перед их сбросом в водные объекты

для снижения негативного воздействия транспорта на них. Наиболее часто встречаемый расход поверхностных стоков до участка переполнения лотка, где необходимо устанавливать водоотводные лотки, составляет 0,6—1,9 л/с, при этом длина участка равняется 50—200 м.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 075-03-2023-128).

Список литературы

1. Герасимов Ю. Ю., Соколов А. П., Катаров В. К. Разработка системы оптимального проектирования сети лесовозных автомобильных дорог // Информационные технологии. 2011. № 1. С. 39—43.
2. Степанов А. В., Петров А. Н. Анализ сети лесовозных дорог Республики Карелия // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2014. № 8-2 (145). С. 78—81.
3. Стратегия развития лесного комплекса Республики Карелия до 2030 года. Петрозаводск, 2019. 64 с.
4. Елисеев Д. О., Наумова Ю. В. Программно-целевое управление развитием транспортной системы Арктической зоны: цели, задачи и ожидаемые результаты // Экономика и бизнес: теория и практика. 2020. № 12-1 (70). С. 226—234. DOI: 10.24411/2411-0450-2020-11054.
5. Тарасов П. И., Зырянов И. В., Хазин М. Л. Транспортный коридор через западную Якутию // Горный информационно-аналитический бюллетень: научно-техн. журнал. 2018. № 6. С. 170—184. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-170-184.
6. Постановление Правительства РФ от 17.11.2010 № 928 «О перечне автомобильных дорог общего пользования федерального значения» / ФКУ «Управление автомобильной магистрали Санкт-Петербург — Мурманск Федерального дорожного агентства». Петрозаводск, 2011. 28 с.
7. Бжеленко П. В., Антонова Т. С., Тюрин Н. А. Количественная оценка объёмов лесного дорожного строительства для полного транспортного освоения лесов в Северо-Западном федеральном округе / Цифровые технологии в лесном секторе: Материалы II Всерос. научно-техн. конф.-вебинара, Санкт-Петербург, 18—19 февраля 2021 года. СПб.: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова, 2021. С. 32—34.
8. Иващук О. А. Оценка, прогнозирование и оптимизация загрязнённости поверхности стока с автодорог в условиях конкретного региона (на примере г. Орла) // Вестник Московского автомобильно-дорожного института (государственного технического университета). 2008. № 4 (15). С. 112—117.
9. Ким А. Н., Графова Е. О. Особенности очистки поверхностных стоков федеральной трассы «Кола» // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. № 10-11 (694-695). С. 49—59.
10. ОДМ 218.3.115—2019 Конструирование и расчёт водоотводных лотков закрытого типа для автомобильных дорог и аэродромов / Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). М., 2021. 180 с.
11. Швалов П. Г. Проблемные факторы развития логистики скоростных перевозок в макро- и мезологистических системах // Социально-экономический и гуманитарный журнал. 2016. № 4 (4). С. 133—142.

12. Kelly M. C., Germain R. H., Bick S. Impacts of Forestry Best Management Practices on Logging Costs and Productivity in the Northeastern USA // *Journal of Forestry*. 2017. № 6 (115). P. 503—512. DOI: 10.20546/ijcmas.2021.1001.292.
13. Sustainable forest management a global review / Dh. Kumar, C. L. Thakur, D. R. Bhardwaj, N. Sharma, H. Sharma, P. Sharma // *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* Vol. 10. P. 2529—2541.
14. The road towards wildlife friendlier infrastructure: Mitigation planning through landscape-level priority settings and species connectivity frameworks / Evi A. D. Paemelaere, A. Mejía, S. Quintero, M. Hallett, F. Li, A. Wilson, H. Barnabas, A. Albert, Rh. Li, L. Baird, G. Pereira, J. Melville // *Environmental Impact Assessment Review*. 2023. Vol. 99. 20 p. DOI: 10.1016/j.eiar.2022.107010.

References

1. Gerasimov Yu. Yu., Sokolov A. P., Katarov V. K. Development of an optimal design system for a network of logging roads. *Information technologies*, 2011, no. 1, pp. 39—43. (In Russ.)
2. Stepanov A. V., Petrov A. N. Analysis of the network of logging roads in the Republic of Karelia. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, no. 8-2 (145), pp. 78—81. (In Russ.)
3. Strategy for the development of the forest complex of the Republic of Karelia until 2030. Petrozavodsk, 2019. 64 p. (In Russ.)
4. Eliseev D. O., Naumova Yu. V. Program-targeted management of the development of the transport system of the Arctic zone: goals, objectives and expected results. *Economics and business: theory and practice*, 2020, no. 12-1 (70), pp. 226—234. doi: 10.24411/2411-0450-2020-11054. (In Russ.)
5. Tarasov P. I., Zyryanov I. V., Khazin M. L. Transport corridor through western Yakutia. *Mining information and analytical bulletin: scientific and technical journal*, 2018, no. 6, pp. 170—184. doi: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-170-184. (In Russ.)
6. Decree of the Government of the Russian Federation of November 17, 2010, no. 928 «On the list of public roads of federal significance», FKU «Management of the St. Petersburg — Murmansk Highway of the Federal Road Agency». Petrozavodsk, 2011. 28 p. (In Russ.)
7. Bzhelenko P. V., Antonova T. S., Tyurin N. A. Quantitative assessment of the volume of forest road construction for the full transport development of forests in the Northwestern Federal District. *Digital technologies in the forest sector: Proceedings of the II All-Russian scientific and technical conference-webinar, St. Petersburg, February 18—19, 2021*. St. Petersburg, St. Petersburg State Forestry University named after S. M. Kirova, 2021, pp. 32—34. (In Russ.)
8. Ivashchuk O. A. Estimation, forecasting and optimization of pollution of surface runoff from roads in a particular region (on the example of the city of Orel). *Bulletin of the Moscow Automobile and Road Institute (State Technical University)*, 2008, no. 4 (15), pp. 112—117. (In Russ.)
9. Kim A. N., Grafova E. O. Peculiarities of surface water treatment of the federal highway «Kola». *News of higher educational institutions. Construction*, 2016, no. 10-11 (694-695), pp. 49—59. (In Russ.)
10. ODM 218.3.115—2019 Design and calculation of closed-type drainage trays for roads and airfields, Federal Road Agency (Rosavtodor). Moscow, 2021. 180 p. (In Russ.)

11. Shvalov P. G. Problematic factors in the development of high-speed transportation logistics in macro- and mesological systems. *Socio-economic and humanitarian journal*, 2016, no. 4 (4), pp. 133—142. (In Russ.)
12. Kelly M. C., Germain R. H., Bick S. Impacts of Forestry Best Management Practices on Logging Costs and Productivity in the Northeastern USA. *Journal of Forestry*, 2017, no. 6 (115), pp. 503—512. doi: 10.20546/ijcmas.2021.1001.292.
13. Kumar Dh., Thakur C. L., Bhardwaj D. R., Sharma N., Sharma H., Sharma P. Sustainable forest management a global review. *Int. J. Curr. Microbiol.*, 2021, App. Sci. Vol. 10, pp. 2529—2541.
14. Paemelaere Evi A. D., Mejía A., Quintero S., Hallett M., Li F., Wilson A., Barnabas H., Albert A., Li Rh., Baird L., Pereira G., Melville J. The road towards wildlife friendlier infrastructure: Mitigation planning through landscape-level priority settings and species connectivity frameworks. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, vol. 99. 20 p. doi: 10.1016/j.eiar.2022.107010.

© Графова Е. О., Степанов А. В., Сюнёв В. С., Катаров В. К., 2023