

№21 (4)

ISSN 2307-0048

Resources and Technology

научный журнал

2024

Содержание №4, Т. 21, 2024

<i>Дмитриев А. С., Должиков И. С., Куницкая О. А., Дьяченко В. М., Хитров Е. Г., Кривошеев А. А.</i>	Результаты вычислительного эксперимента по определению оптимальных параметров и показателей работы колёсно-гусеничного движителя лесной машины	1 - 43
<i>Помогаев В. М., Ревякин П. И., Басакина А. С.</i>	Способ и процессная модель предварительной обработки данных автоматизированных систем контроля технического состояния зерноуборочных комбайнов	44 - 65
<i>Кривошеев А. А., Швецов А. С., Бурмистрова О. Н., Григорьев И. В., Ревяко С. И., Охлопкова М. К.</i>	Обоснование необходимости исследования воздействия валочно-трелёвочно-процессорных машин на почвогрунты лесосек на склонах	66 - 120
<i>Васильев В. В., Афоничев Д. Н.</i>	Планирование поставки лесоматериалов потребителям по транспортно-технологической схеме плот (линейка) — плот	121 - 149
<i>Мануковский А. Ю., Шадрин Я.</i>	Гидродинамическое сопротивление лесотранспортных единиц новой конструкции	150 - 164
<i>Орловский С. Н., Саая С. Ш.</i>	Цепной рабочий орган для удаления крупных пней к экскаватору ЭТЦ-208	165 - 174

УДК 630*

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7743

Статья

Результаты вычислительного эксперимента по определению оптимальных параметров и показателей работы колёсно-гусеничного движителя лесной машины

Дмитриев Александр Сергеевич

ассистент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Российская Федерация), dmitriev.nauka@mail.ru

Должиков Илья Сергеевич

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

Куницкая Ольга Анатольевна

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

Дьяченко Владимир Михайлович

аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна (Российская Федерация), Volodya.Dyachenko1986@mail.ru

Хитров Егор Германович

доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Российская Федерация), yegorkhitrov@gmail.com

Кривошеев Андрей Александрович

аспирант, Ухтинский государственный технический университет (Российская Федерация), ugtukrivosheev@mail.ru

Получена: 4 марта 2024 / Принята: 15 октября 2024 / Опубликовано: 2 ноября 2024

Аннотация: При проведении малообъёмных лесозаготовок в России обычно используют машины, созданные на базе колёсных сельскохозяйственных тракторов малого и среднего класса тяги. Эти тракторы при своей сравнительно низкой стоимости в приобретении и эксплуатации обладают хорошей надёжностью и значительной универсальностью, которая заключается в том,

что их можно использовать не только на лесосечных и лесохозяйственных работах, но и для коммунального хозяйства, и собственно сельскохозяйственных работ, что обеспечивает их круглогодичную эффективную эксплуатацию. Однако при работе в сложных условиях — на глубоком снеге, при слабонесущих почвогрунтах, на подъёмах таким тракторам не хватает тягового усилия. В этой связи в сельскохозяйственном производстве разработан и успешно используется достаточно простой способ перевода колёсных тракторов на полугусеничный ход. Это обеспечивает существенное увеличение их проходимости в сложных условиях эксплуатации, повышение силы тяги и существенную экономию топлива. В данной статье представлены результаты вычислительного эксперимента, в задачи которого входило (на основании ранее разработанной и исследованной математической модели обоснования оптимальных параметров колёсно-гусеничного движителя лесной машины) определить оценку глубины образующейся колеи, тягово-сцепных свойств движителя и требуемой мощности при заданных свойствах почвогрунта и варьировании нагрузки со стороны колёсного и гусеничного движителя.

Ключевые слова: полугусеничный ход; лесозаготовка; лесные машины; трелёвка; образование колеи; коэффициент буксования; лесные почвогрунты; вычислительный эксперимент

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7743

Article

The results of a computational experiment to determine the optimal parameters and performance indicators of a wheeled-caterpillar mover of a forest machine

Alexander Dmitriev

assistant, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Russian Federation), dmitriev.nauka@mail.ru

Ilya Dolzhikov

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

Olga Kunitskaya

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

Vladimir Dyachenko

Ph. D. student, Saint Petersburg State University of Industrial Technology and Design (Russian Federation), Volodya.Dyachenko1986@mail.ru

Egor Khitrov

D. Sc. in engineering, associate professor, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University (Russian Federation), yegorkhitrov@gmail.com

Andrey Krivosheev

Ph. D. student, Ukhta State Technical University (Russian Federation), ugtukrivosheev@mail.ru

Received: 4 March 2024 / Accepted: 15 October 2024 / Published: 2 November 2024

Abstract: In Russia low-volume logging is performed with machines based on wheeled agricultural tractors of small and medium traction. These tractors have low cost of purchase and operation and are reliable and versatile because they can be used for not only logging and forestry work, but also for community services and agricultural work thus ensuring their year-round efficient operation. However, such tractors feature insufficient tractive force when working in difficult conditions: on deep snow, weak soils or on the rise. In this regard, a rather simple method of converting a wheeled tractor to a semi-crawler unit has been developed and successfully used in agricultural

production. This provides a significant increase in their cross-country ability in difficult operating conditions, increased traction, and significant fuel savings. This article presents the results of a computational experiment based on a previously developed and researched mathematical model for substantiating the optimal parameters of a wheeled and caterpillar mover of a forest machine. The purpose of the experiment was to determine and evaluate the depth of the formed track, traction properties of the mover and the required power for given soil properties and varying loads from the wheeled and tracked mover.

Keywords: half-track running; logging; forest machines; skidding; track formation; slip coefficient; forest soils; computational experiment

1. Введение

В Российской Федерации подавляющее большинство лесопользователей по годовым объёмам работ относятся к мелким и малообъёмным. Они выполняют работы по заготовке древесины, лесовосстановлению, другим лесохозяйственным мероприятиям, включая подряды в рамках компенсационного лесовосстановления [1—4]. Такие лесопользователи в основном, помимо лесосечных и лесовосстановительных работ, занимаются другими подрядными работами, включая сельское хозяйство. При этом обычно используются системы машин на базе наиболее широко распространённых колёсных сельскохозяйственных тракторов малого и среднего класса тяги [5—8]. Они достаточно дешёвые в приобретении и обслуживании, могут быть перемещены своим ходом между рабочими участками. В Российской Федерации это, в основном, колёсные тракторы Минского тракторного завода, широко известные под аббревиатурой МТЗ. Очень часто можно услышать мнение потребителей, что по соотношению цена/качество — это лучшие тракторы на российском рынке.

Но в сложных условиях эксплуатации (глубокий снежный покров, слабонесущие почвогрунты, потребность в большой силе тяги на крюке, например, при работе с плугом и бороной) эти тракторы в своей колёсной версии «не тянут» [9]. Для решения этой проблемы разработано и успешно используется в России и за рубежом достаточно простое техническое решение, позволяющее в короткое время и без больших затрат переоборудовать ходовую часть колёсного трактора в полугусеничный ход, когда передний мост трактора остаётся колёсным, а задний становится гусеничным (фото 1).



Фото 1. Трактор МТЗ с полугусеничным движителем (фронтальный погрузчик)
[фото авторов]

Photo 1. MTZ tractor with a semi-crawler mover (front loader)

Благодаря использованию такого технического решения у трактора существенно снижается давление на поверхность движения и повышается крюковая сила тяги [10]. Это значительно повышает его эксплуатационные возможности для применения на лесосечных и лесохозяйственных работах, используя такую комбинированную ходовую часть как базу для различных специальных лесных машин (фото 2).



Фото 2. Форвардер на базе трактора на полугусеничном ходу [фото авторов]

Photo 2. Forwarder based on a semi-crawler unit

Возможность быстрой смены колёсного хода на полугусеничный и обратно позволяет перемещать такую лесную машину своим ходом между делянками, не затрачиваясь на тягач и трал. Для мелких и малообъёмных лесозаготовительных предприятий это очень большое преимущество, поскольку, обычно, они имеют дело с небольшими по площади и рассредоточенными по лесному массиву делянками [1—4]. Повышение крюковой силы тяги позволяет лесной машине даже на базе трактора малого класса тяги работать с лесным плугом, например, при создании обязательных минерализованных полос вокруг лесных культур при искусственном лесовосстановлении [11—14].

Поскольку в настоящее время на практике большая часть тракторов МТЗ на полугусеничном ходу используется на трелёвке в качестве форвардеров (сортиментоподборщиков) в тяжёлых условиях эксплуатации — глубокий снег, слабонесущие почвогрунты, для хороших условий эксплуатации на базе полугусеничных лесных машин возможно создавать бесчokerные трелёвочные тракторы или даже универсальные трелёвщики, также называемые комбитрелёвщики, по примеру колёсного трактора HSM208F Combi компании HSM Hohenloher Spezial-Maschinenbau GmbH, одновременно совмещающего в своей конструкции возможности форвардера и бесчokerного трелёвочного трактора [15]. Такие небольшие и при этом достаточно маневренные тракторы, помимо лесосечных работ на малообъёмных рубках спелых и перестойных насаждений, могут успешно использоваться на рубках ухода за лесом и при машинной очистке лесосек от порубочных остатков [16—21].

2. Материалы и методы

В публикации [22] представлены результаты теоретических исследований, посвящённых разработке математической модели для обоснования оптимальных параметров колёсно-гусеничного движителя лесной машины. Большое число входных параметров данной модели и нелинейные связи учитываемых в ней величин объясняют сложность проведения расчётов. В работе [23] отмечается, что при теоретическом исследовании колееобразования и проходимости техники объектом исследования фактически становится сама математическая модель, предметом — числовые значения изучаемых параметров и их связи с входными параметрами.

Новизна результатов, представленных в данной статье, состоит в комплексности оценки колееобразования и тягово-сцепных свойств комбинированного движителя, выполняемой с учётом различия геометрических параметров пятен контакта, времени воздействия и величины нагрузки на грунт со стороны колёсной и гусеничной пары лесной полугусеничной машины.

Для проведения вычислительного эксперимента нами подготовлены семь компьютерных программ на языке программирования Python. Программы позволяют:

- Выполнить оценку глубины образующейся колеи, тягово-сцепных свойств движителя и требуемой мощности при заданных свойствах почвогрунта и варьировании нагрузки со стороны колёсного и гусеничного движителя. Программы предназначены для обоснования допустимой нагрузки на почвогрунт со стороны движителя.

- Выполнить оценку тягово-сцепных свойств и требуемой мощности при заданной глубине колеи, образовавшейся в результате прохода колёсного и гусеничного движителя, и варьировании свойств почвогрунта. Программы предназначены для обоснования параметров движителей, обеспечивающих проходимость машины при соблюдении условий об ограничении глубины образующейся колеи.

- Изучить влияние переменного коэффициента буксования при заданных параметрах движителя и почвогрунта на оценку тягово-сцепных свойств колёсного и гусеничного движителя. Как правило, в расчётах принимают коэффициент буксования как входной параметр [23]. Однако до настоящего времени подробно связь буксования и тягово-сцепных свойств не изучена. В нашей работе программы использованы на предварительном этапе при подборе параметра S — коэффициента буксования. Установлено, что для лесных почвогрунтов средней прочности и слабонесущих лесных почвогрунтов максимальные оценки сцепления отмечаются при $S < 0,2$. Таким образом, при входном параметре $S = 0,2$ теоретические оценки сцепных свойств движителей не будут завышены. Кроме того, отдельные программы необходимы для определения максимальных коэффициентов сцепления и тяги в дальнейших исследованиях.

- Обосновать допустимую нагрузку со стороны гусеничного движителя, проходящего вслед за колёсным, с учётом ограничения суммарной глубины колеи при заданных свойствах лесного почвогрунта и варьировании нагрузки со стороны колёсного движителя.
- Определить общий допустимый вес комбинированной машины с учётом распределения нагрузки между колёсной и гусеничной парами.

3. Результаты

3.1. Результаты расчётов для колёсного движителя

Разработка программ отдельно для изучения показателей работы колёсного и гусеничного движителя выполнена по причине существенных различий двух рассматриваемых случаев. Эластичность колёсного движителя вызывает изменение длины пятна контакта непосредственно в процессе образования колеи, причём в расчётах необходим учёт как параметров движителя, так и почвогрунта.

Для доказательства этого обстоятельства приведём результаты расчётов (рисунок 1). График иллюстрирует изменение параметра J , учитывающего влияние формы пятна контакта (соотношения сторон) на распространение сжимающего напряжения по глубине массива почвогрунта — уравнение (1). Формула, позволяющая учесть время действия нагрузки и возможную потерю несущей способности почвогрунта [24], [25]:

$$h = \frac{p_s}{p_s - p} \cdot \frac{KJpab}{\sqrt{1 - JpK}} \operatorname{arctg} \frac{H - h}{ab\sqrt{1 - JpK}} \quad (1)$$

где p_s — несущая способность почвогрунта, K — параметр, зависящий от физико-механических свойств и используемой реологической модели почвогрунта, учитывающий время воздействия движителя на почвогрунт, коэффициенты J , a — параметры, учитывающие соотношение усреднённой ширины и длины пятна контакта, H — мощность деформируемого слоя почвогрунта (глубина распространения деформаций либо толщина деформируемого слоя почвогрунта).

Результаты расчёта получены для почвогрунта II категории прочности (почвогрунт средней прочности), $E = 1,0$ МПа, параметры движителя: $b = 0,7$ м, $d = 1,333$ м, $p_w = 0,35$ МПа, $H_T = 0,75b$, $w = \operatorname{var}$, $t_{rp} = 0,14$ м, $S = 0,2$, $\alpha = 0^\circ$.

Пример показывает, что параметр J , включаемый в одну из основных формул математической модели, изменяется ориентировочно на 40 % в процессе образования колеи до 20—25 см.

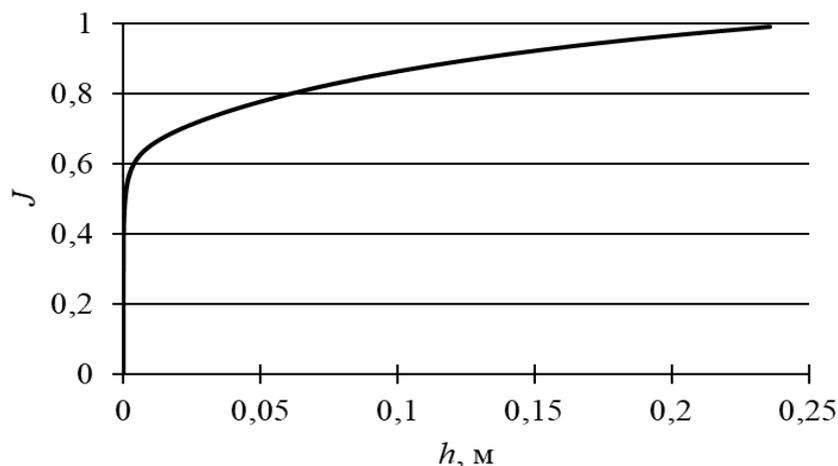


Рисунок 1. Изменение параметра, учитывающего соотношение сторон пятна контакта колёсного движителя с почвогрунтом, по мере увеличения глубины образующейся колеи [рисунок авторов]

Figure 1. Changing the parameter that takes into account the aspect ratio of the contact spot of the wheel mover with the soil, as the depth of the formed track increases

Переменная длина пятна контакта эластичного колеса с почвогрунтом заметно влияет и на оценку p среднего давления движителя по пятну контакта. На рисунке 2 приведены результаты расчёта среднего давления при варьировании веса w , отнесённого к единичному колёсному движителю (исходные данные те же).

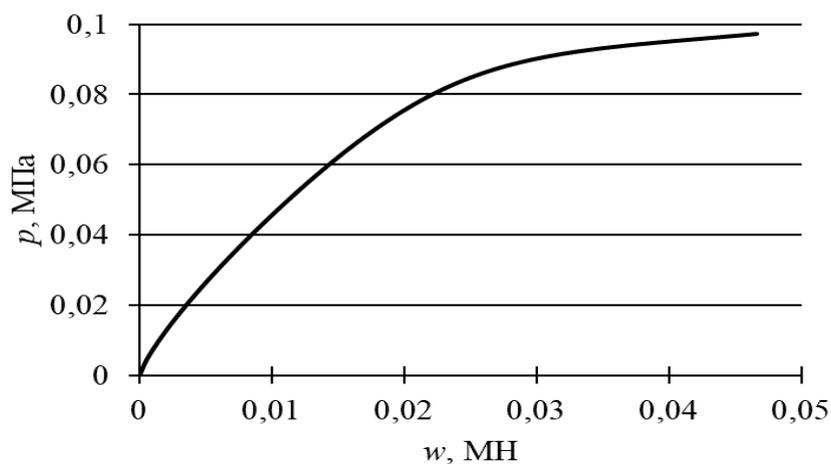


Рисунок 2. Изменение среднего давления колёсного движителя по пятну контакта при увеличении нагрузки, отнесённой к единичному движителю [рисунок авторов]

Figure 2. The change in the average pressure of the wheel mover along the contact spot with an increase in the load attributed to a single mover

Кроме того, несущая способность почвогрунта также переменна в процессе образования колеи [23—25]. Коэффициенты J_1, J_3 в формуле (2) учитывают влияние соотношения длины l и ширины b пятна контакта на несущую способность, пример результатов расчёта приведён на рисунке 3.

$$J_1 = \frac{l}{l + 0,4b}, \quad J_3 = \frac{l + b}{l + 0,5b'} \quad (2)$$

Отметим, что с глубины колеи ориентировочно 0,1 м расчётное значение несущей способности стабилизируется и в рассмотренном примере составляет ориентировочно 10 % от значения модуля деформации E .

Пример результатов расчёта глубины образующейся колеи h при варьировании нагрузки w , отнесённой к единичному колёсному движителю, представлен на рисунке 4.

Важно отметить, что связь веса w и глубины колеи h нелинейна, однако в приведённом примере поведение функции $h(w)$ сравнительно стабильно, что можно объяснить увеличением площади пятна контакта колеса с почвогрунтом.

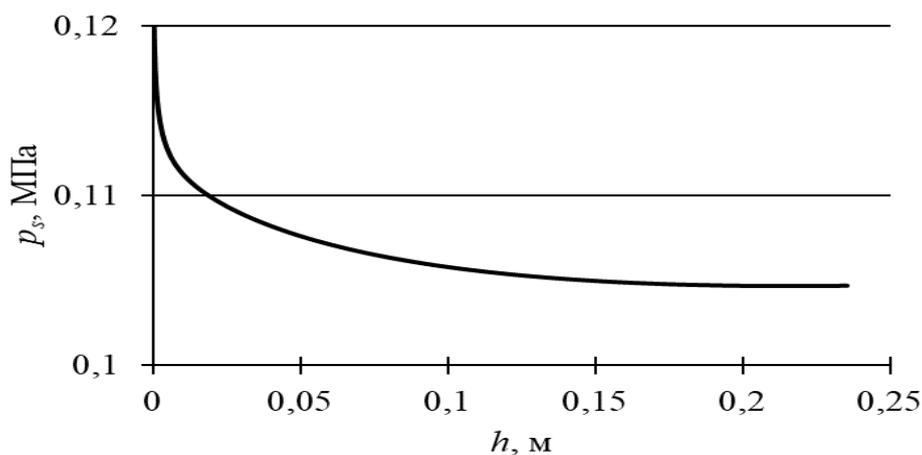


Рисунок 3. Изменение расчётной величины несущей способности почвогрунта, находящегося под воздействием колёсного движителя, по мере увеличения глубины колеи [рисунок авторов]

Figure 3. The change in the calculated value of the bearing capacity of the soil under the influence of the wheel mover with the increasing depth of the track

Более резкое изменение отмечается для функции среднего давления p от h (рисунок 5, исходные данные для расчёта прежние).

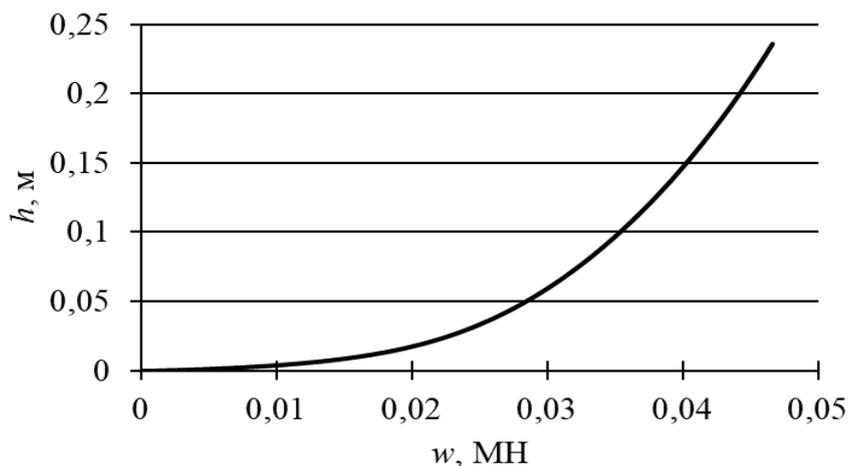


Рисунок 4. Результаты расчёта глубины колеи при изменении нагрузки [рисунок авторов]

Figure 4. The results of calculating the depth of the track when the load changes

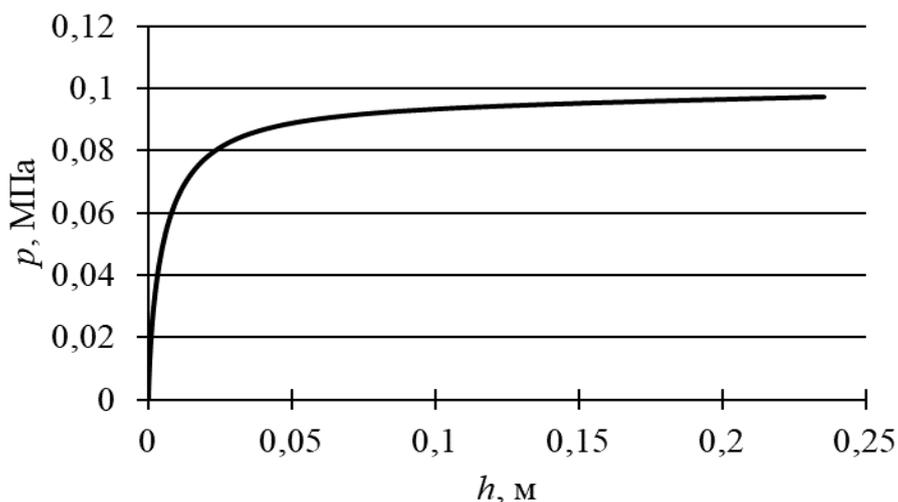


Рисунок 5. Результаты оценки связи среднего давления по пятну контакта и глубины образующейся колеи [рисунок авторов]

Figure 5. The results of the evaluation of the relationship between the average pressure on the contact spot and the depth of the formed track

С определённого значения отмечается резкое изменение глубины колеи при сравнительно небольшом увеличении среднего давления. Такой характер связи присутствует при среднем давлении p , близком к оценке несущей способности p_s .

Резкое изменение оценки коэффициента сопротивления движению φ_R также отмечается при среднем давлении по пятну контакта p , близком к несущей способности p_s (рисунок б).

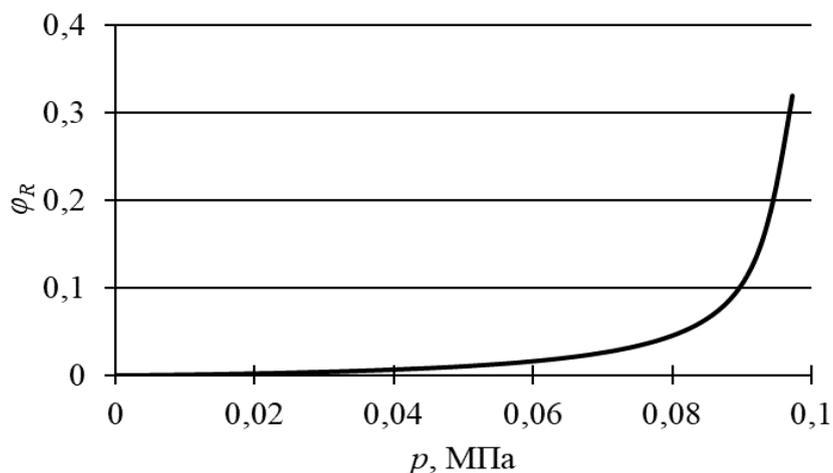


Рисунок 6. Результаты расчёта коэффициента сопротивления движению в зависимости от среднего давления по пятну контакта [рисунок авторов]

Figure 6. The results of calculating the coefficient of resistance to movement depending on the average pressure along the contact spot

На основе расчётных данных о коэффициенте сопротивления движению получим и приведём на рисунке 7 оценку мощности двигателя N (по отношению к единичному колёсному движителю), при которой обеспечивается поступательное движение машины со средней скоростью $v = 5$ км/ч.

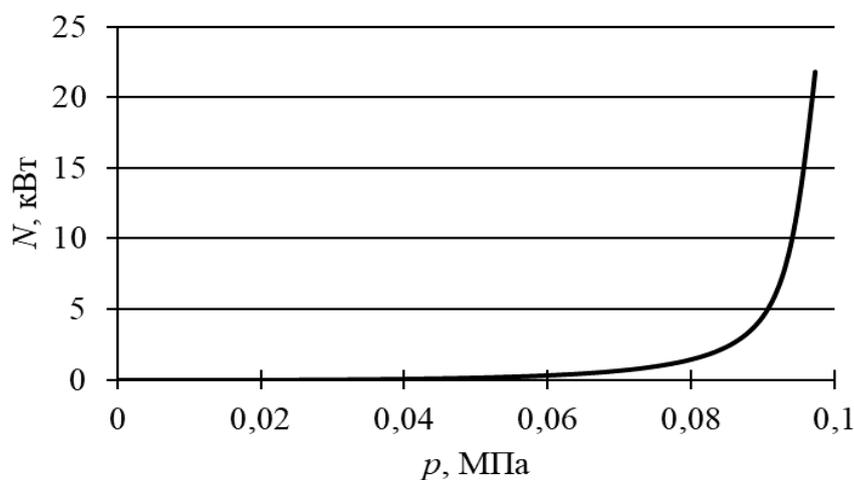


Рисунок 7. Мощность двигателя, отнесённая к единичному движителю, требуемая для движения машины с поступательной скоростью 5 км/ч [рисунок авторов]

Figure 7. The engine power attributed to a single engine required to move the machine at a forward velocity of 5 km/h

Стабильнее изменяется оценка коэффициента сцепления. Пример результатов расчёта, выполненного при прежних исходных данных, представлен на рисунке 8.

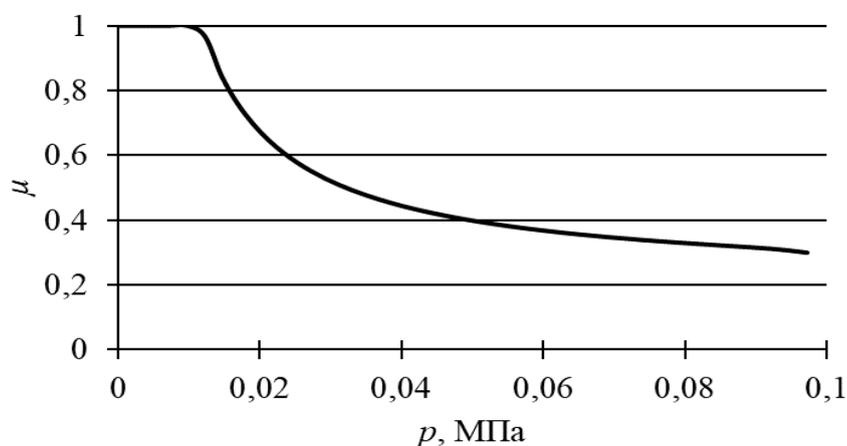


Рисунок 8. Результаты расчёта коэффициента сцепления в зависимости от среднего давления по пятну контакта [рисунок авторов]

Figure 8. The results of the calculation of the coefficient of adhesion depending on the average pressure on the contact spot

С точки зрения практики информативнее оценка коэффициента тяги φ_P . Для указанной величины отмечается нулевое значение при давлении, близком к несущей способности почвогрунта, рисунок 9.

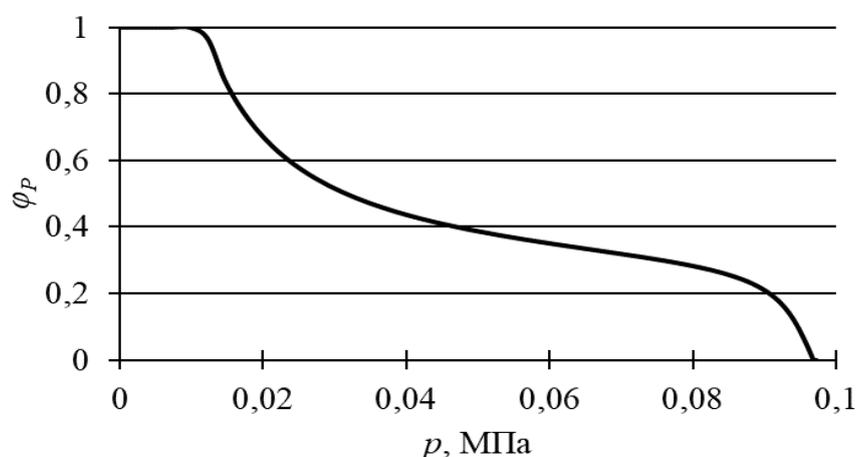


Рисунок 9. Результаты расчёта коэффициента тяги в зависимости от среднего давления по пятну контакта [рисунок авторов]

Figure 9. The results of calculating the thrust coefficient depending on the average pressure along the contact spot

Анализ полученных расчётных данных для колёсного движителя показывает, что использование среднего давления по пятну контакта p не вполне удобно с точки зрения практики. Ввиду изменчивости свойств лесного почвогрунта, многообразия конструктивных параметров движителя, наличия дополнительных факторов, не включённых в теоретические модели на настоящем этапе исследований, точная оценка длины пятна контакта l и среднего давления p едва ли возможна и целесообразна.

Результаты, полученные при расчёте глубины колеи h при изменении давления p , прогнозируют определённый диапазон изменения p , соответствующий резкому изменению h . При этом оценки тягово-сцепных свойств, получаемые при моделировании, свидетельствуют, что при глубине колеи ориентировочно 0,2 м колёсный движитель теряет проходимость. Резко увеличивается и расчётное значение мощности N , обеспечивающей поступательное движение машины.

Это обстоятельство хорошо согласуется с известной практической рекомендацией [26—28], заключающейся в подборе параметров движителя таким образом, чтобы в заданных почвенно-грунтовых условиях ограничить глубину колеи определённым «пороговым» значением (20 см [29—31]). Причём в представленном примере (рисунок 5) отмеченному пороговому значению соответствует диапазон среднего давления $p = 0,08—0,10$ МПа, что составляет ориентировочно 80 % оценки p_s .

Рассмотрим результаты сопоставления расчётных данных для глубины колеи h и тягово-сцепных свойств колёсного движителя (рисунки 10—12), а также мощности N (рисунок 13). Исходные данные для иллюстрации оставим прежними.

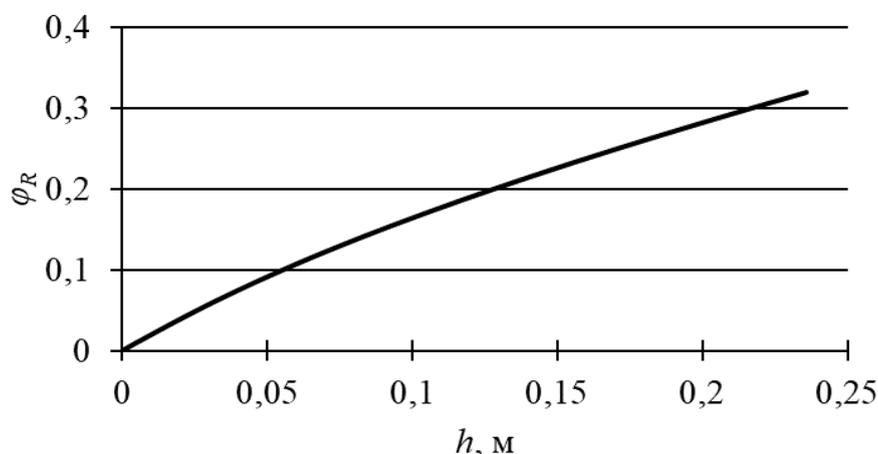


Рисунок 10. Сопоставление коэффициента сопротивления движению и глубины колеи [рисунок авторов]

Figure 10. Comparison of the coefficient of resistance to movement and the depth of the track

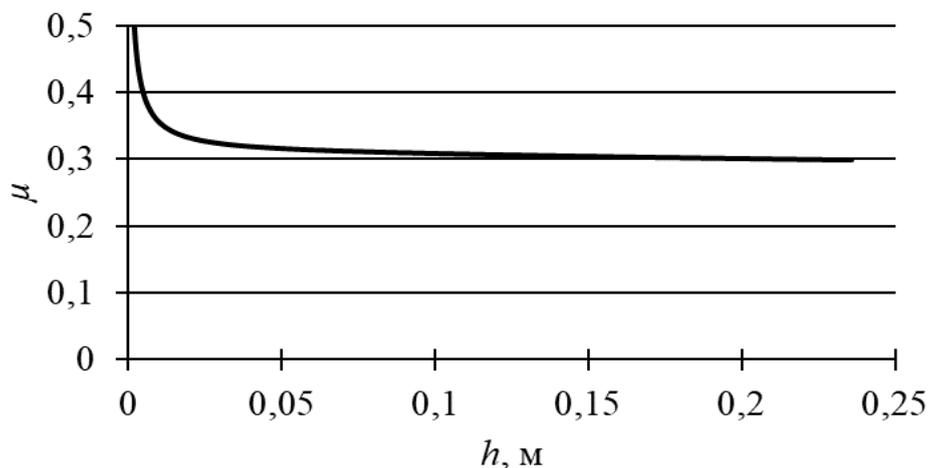


Рисунок 11. Сопоставление коэффициента сцепления и глубины колеи [рисунок авторов]

Figure 11. Comparison of the coefficient of adhesion and the depth of the track

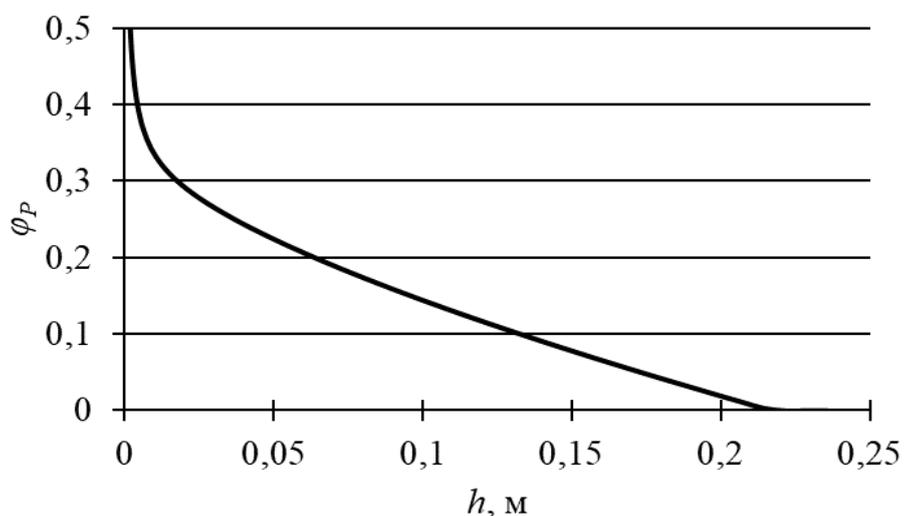


Рисунок 12. Сопоставление коэффициента тяги и глубины колеи [рисунок авторов]

Figure 12. Comparison of traction coefficient and track depth

Отметим практически линейные связи полученных расчётных значений с глубиной колеи h . Потеря проходимости отмечается при глубине колеи свыше 0,2 м. Таким образом, задавшись допустимым значением глубины колеи, с точки зрения практики удобно обосновать диапазон нагрузки, в котором $h < h_{\text{крит}}$, а дальнейшее обоснование параметров движителя вести относительно глубины колеи h .

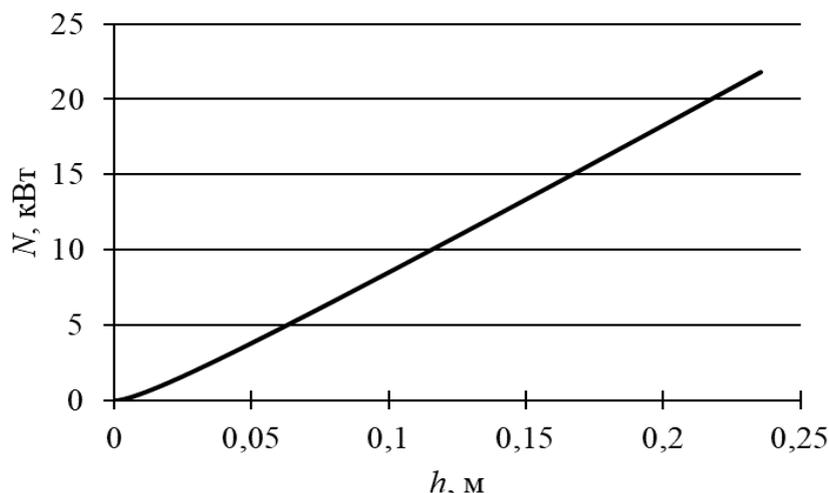


Рисунок 13. Сопоставление требуемой мощности двигателя, отнесённой к единичному колёсному движителю, и глубины колеи [рисунок авторов]

Figure 13. Comparison of the required engine power attributed to a single wheel mover and the track depth

Для уточнения диапазона изменения входных параметров к дальнейшей реализации модели выполним расчёты для указанного «предельного» случая.

Для лесных почвогрунтов установлены зависимости, позволяющие приближённо рассчитать ω , C , φ , γ , G по величине модуля E . Приведём их согласно публикации [23]:

$$C = 10,774E^{0,7737}, \quad (3)$$

$$\varphi = 13,669E^{0,1818}, \quad (4)$$

$$\gamma = 8,4008E^{0,1168}, \quad (5)$$

$$G = 2,4388E^{0,1161}, \quad (6)$$

$$\omega = 1,7880E^{1,9200} \quad (7)$$

Разработанная программа позволяет рассчитать тягово-сцепные свойства колёсного движителя и требуемую мощность N при заданном значении глубины колеи h .

Далее будем пользоваться модулем деформации в качестве основной характеристики механических свойств лесного почвогрунта, что справедливо с учётом формул (3)–(7). Диапазон изменения модуля E в расчётах примем от 0,4 до 1,4 МПа. Таким образом, будут оценены необходимые показатели работы движителя в условиях почвогрунтов III и II категории прочности, представляющих наибольший практический интерес, поскольку

для условий прочных почвогрунтов I категории потеря проходимости и образование глубокой колеи не отмечается [22], [32], [33].

На рисунке 14 проиллюстрирована зависимость расчётного значения несущей способности почвогрунта p_s с учётом образовавшейся колеи $h = 0,2$ м от модуля деформации почвогрунта E . Обработка расчётных данных позволила установить линейную зависимость:

$$p_s = 0,0159 + 0,0883E \quad (8)$$

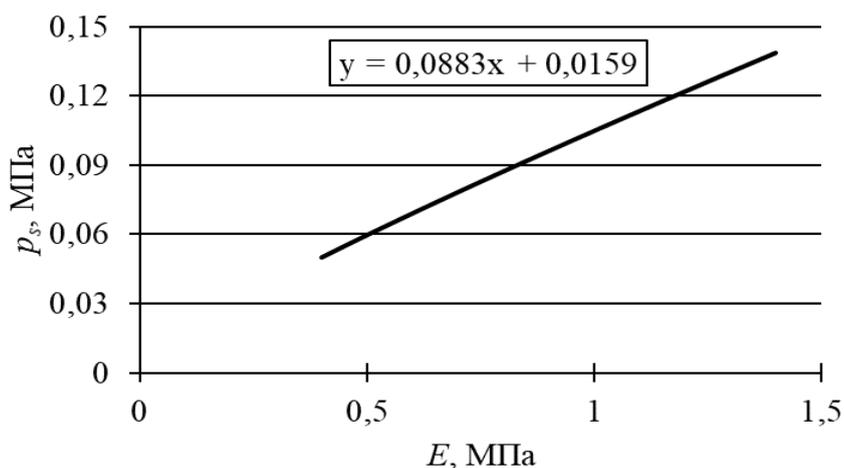


Рисунок 14. Несущая способность почвогрунта, находящегося под воздействием колёсного движителя [рисунок авторов]

Figure 14. Bearing capacity of the soil under the influence of a wheel mover

Важно отметить, что модуль E определяется либо в лабораторных условиях, либо полевыми штамповыми испытаниями с использованием дорогостоящего оборудования [23]. По этой причине для расширения области практического применения результатов исследования были предложены и апробированы уравнения, позволяющие провести оценку модуля E на основе результатов зондирования грунта ручным зондом-пенетрометром [23]. Измеряемой величиной при этом является сопротивление грунта вдавливанию зонда с заданными геометрическими параметрами (в зарубежной литературе — конусный индекс CI). Для пересчёта использовано уравнение, полученное нами на основе аппроксимации данных [23]:

$$CI = 0,41E - 0,097E^2 \quad (9)$$

Зависимость допустимого значения нагрузки со стороны колёсного движителя w от модуля деформации почвогрунта E проиллюстрирована графиком на рисунке 15.

В результате обработки расчётных данных получим следующую формулу:

$$w = 0,0004 + 0,0439E \quad (10)$$

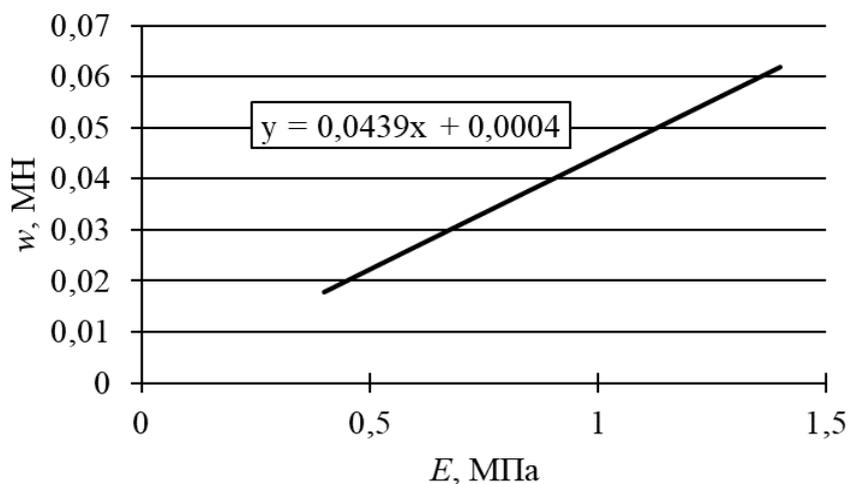


Рисунок 15. Зависимость допустимого значения нагрузки со стороны колёсного движителя от модуля деформации почвогрунта [рисунок авторов]

Figure 15. Dependence of the permissible value of the load from the wheel mover on the modulus of soil deformation

В целом, можем отметить, что среднее давление p , допустимое по критерию глубины образующейся колеи, связано с модулем E функцией (рисунок 16):

$$p = 0,0083 + 0,0878E \quad (11)$$

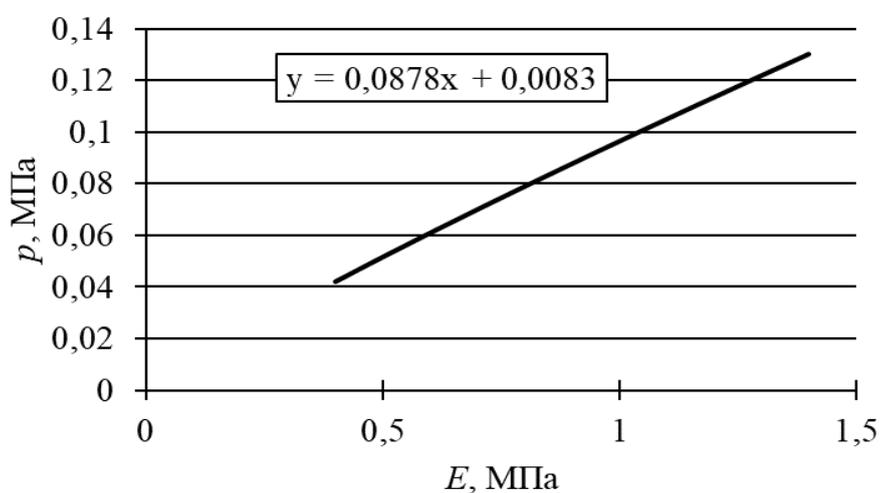


Рисунок 16. Среднее давление колёсного движителя, ограниченное глубиной образующейся колеи [рисунок авторов]

Figure 16. The average pressure of the wheel mover limited by the depth of the formed track

Результаты оценки тягово-цепных свойств колёсного движителя при варьировании механических свойств почвогрунта и глубине колеи $h = 0,2$ м приведены на рисунках 17—19.

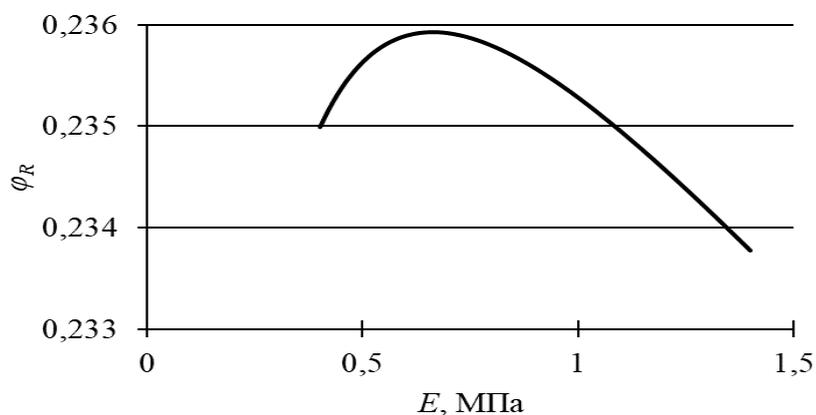


Рисунок 17. Коэффициент сопротивления движению колёсного движителя [рисунок авторов]

Figure 17. Coefficient of resistance to movement of the wheel mover

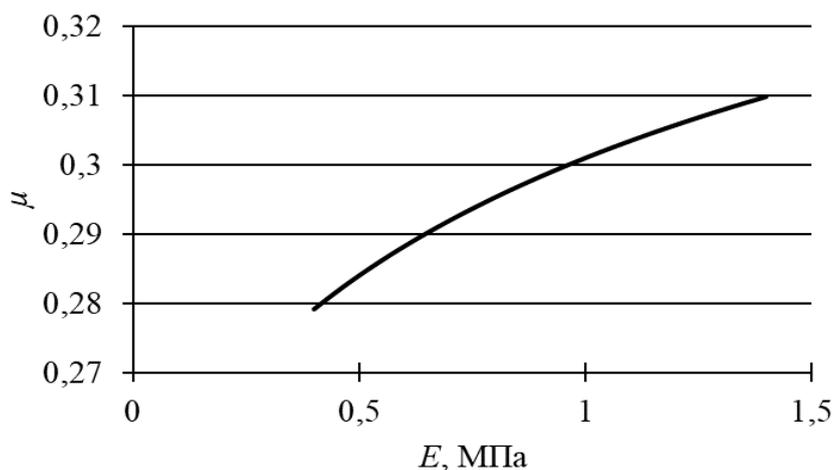


Рисунок 18. Коэффициент сцепления колёсного движителя [рисунок авторов]

Figure 18. The coefficient of adhesion of the wheel mover

Расчёты показали, что при ограничении глубины колеи величиной 0,2 м обеспечена проходимость колёсной пары комбинированной машины, при всех рассмотренных значениях несущей способности коэффициент тяги положителен (рисунок 19).

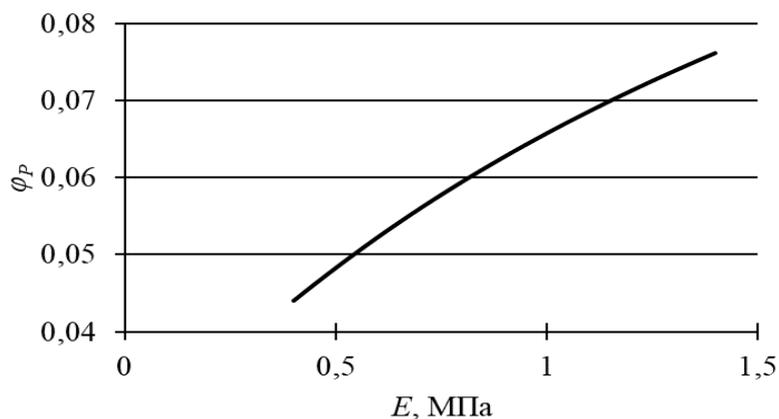


Рисунок 19. Коэффициент тяги колёсного движителя [рисунок авторов]

Figure 19. Coefficient of traction of the wheel mover

Для подбора мощности двигателя комбинированной машины получено следующее уравнение (рисунок 20):

$$N = 0,234 + 14,955E \quad (12)$$

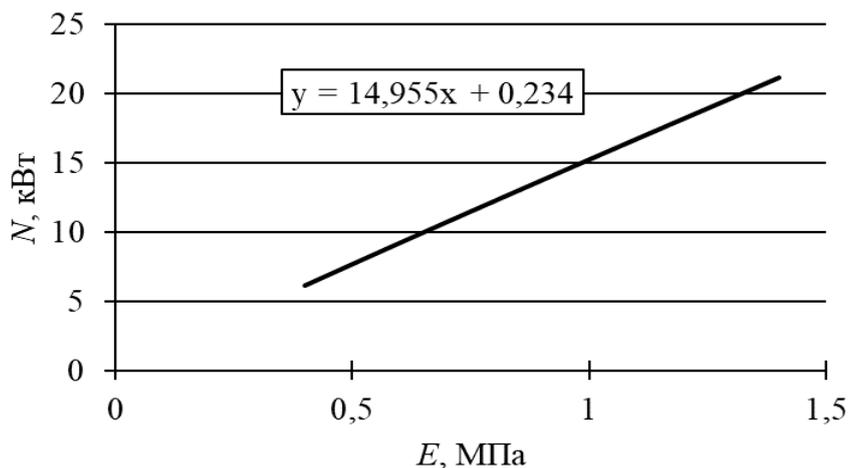


Рисунок 20. Оценка требуемой мощности, обеспечивающей поступательное движение единичного колёсного движителя (глубина колеи 0,2 м) [рисунок авторов]

Figure 20. Estimation of the required power providing forward motion of a single wheel mover (track depth 0.2 m)

Выполненные исследования показали, что использование предельного значения глубины колеи h , задаваемого как параметр математической модели, позволяет получить удобные для практики формулы, оценивающие допустимую нагрузку p , w и требуемую мощность N при варьировании свойств почвогрунта, выраженных через модуль общей деформации E .

Полученные результаты позволяют сделать выводы:

- Для колёсно-гусеничной машины вес, приходящийся на колёсную пару, должен быть ограничен таким образом, чтобы глубина колеи, образующейся после её прохода, не превысила 0,2 м. В противном случае опорная проходимость колёсной пары не обеспечивается. Оценка веса, отнесённого к единичному колёсному движителю при стандартных параметрах, представлена формулой (10). Для более общего случая, при варьировании параметров движителя, получена предельно допустимая оценка среднего давления — формула (11).

- Мощность двигателя машины, отнесённая к единичному колёсному движителю, при глубине колеи 0,2 м определяется формулой (12), которая может использоваться на практике как верхняя оценка требуемой мощности.

3.2. Результаты расчётов для гусеничного движителя

Рассмотрим показатели колееобразования и тягово-сцепные свойства гусеничного движителя. Параметры почвогрунта для иллюстрации примем те же, что и для колёсного движителя, однако изменим длину пятна контакта $l = L_T = 5,0$ м (величина будет постоянной), что приведёт к изменению параметров J и K .

Вначале приведём результаты расчётов составленной программы при варьировании нагрузки для почвогрунта средней прочности.

Обратим внимание (рисунок 21), что несущая способность почвогрунта p_s , находящегося под воздействием гусеничного движителя, повышается по мере увеличения глубины колеи h . Это обстоятельство объясняется уменьшением толщины деформируемого слоя H при постоянной длине l .

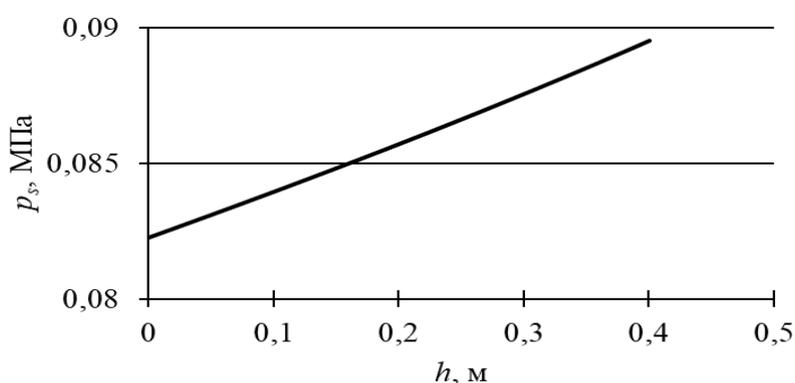


Рисунок 21. Изменение несущей способности почвогрунта, находящегося под воздействием гусеничного движителя, при увеличении глубины колеи [рисунок авторов]

Figure 21. The change in the bearing capacity of the soil under the influence of the caterpillar mover with an increase in the track depth

Впрочем, при ограничении h величиной 0,2 м изменение сравнительно невелико и находится в пределах 5 %. В рассмотренном диапазоне нагрузки w , в отличие от случая колёсного движителя, не отмечается участка столь резкого увеличения глубины колеи h при увеличении давления p (рисунок 22). Тем не менее можно отметить более интенсивное образование колеи при давлении p свыше 0,55—0,06 МПа.

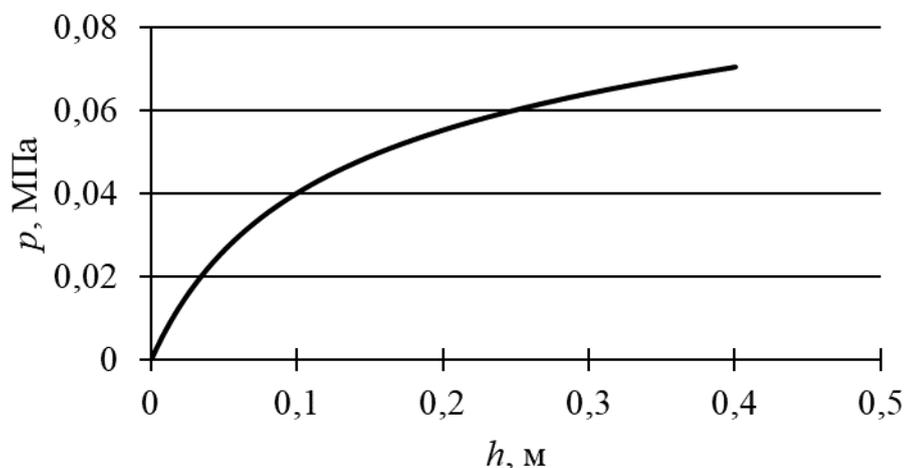


Рисунок 22. Связь среднего давления по пятну контакта и глубины колеи [рисунок авторов]

Figure 22. Relationship between the average pressure along the contact spot and track depth

Для расчёта тягово-сцепных свойств гусеничного движителя необходимо подчеркнуть отличие по сравнению с колёсным: существенно большая длина пятна контакта потребует учёта липкости почвогрунта, увеличивающей сопротивление движению.

Сведений о липкости лесного грунта в научной литературе практически не представлено. На настоящем этапе исследований воспользуемся данными о липкости глинистых (верхняя граница, наибольшая липкость) и суглинистых почвогрунтов. Результаты сопроводим данными, полученными без учёта липкости (нижняя граница).

На основе обработки данных [23] получим уравнения, связывающие среднее давление по пятну контакта с липкостью суглинистого и глинистого почвогрунта соответственно (рисунок 23):

$$\lambda = 0,0102p \quad (13)$$

$$\lambda = 0,0508p \quad (14)$$

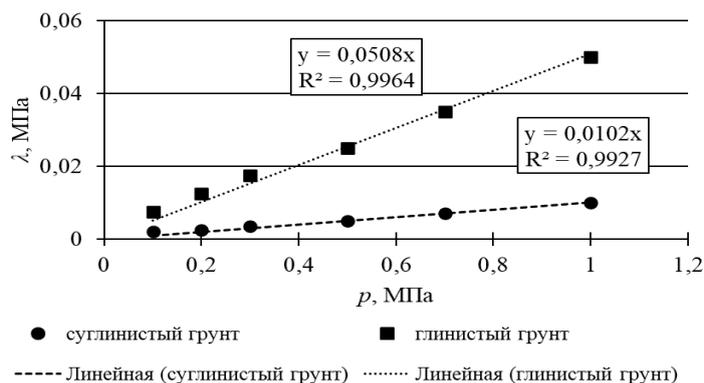


Рисунок 23. Результаты аппроксимации сведений о липкости глинистого и суглинистого почвогрунта [рисунок авторов]

Figure 23. The results of the approximation of information on the stickiness of clay and loamy soils

Составляющую сопротивления движению, связанную с преодолением липкости почвогрунта, выразим по формуле [23]:

$$F_{\lambda} = \lambda bl \quad (15)$$

Результаты расчёта коэффициента сопротивления движению, коэффициента сцепления и коэффициента тяги, полученные при различных допущениях о липкости лесного почвогрунта (сплошная линия — без учёта липкости, пунктирная линия — липкость сопоставима с суглинком, точки — липкость как у глинистого грунта), представлены на рисунках 24—26.

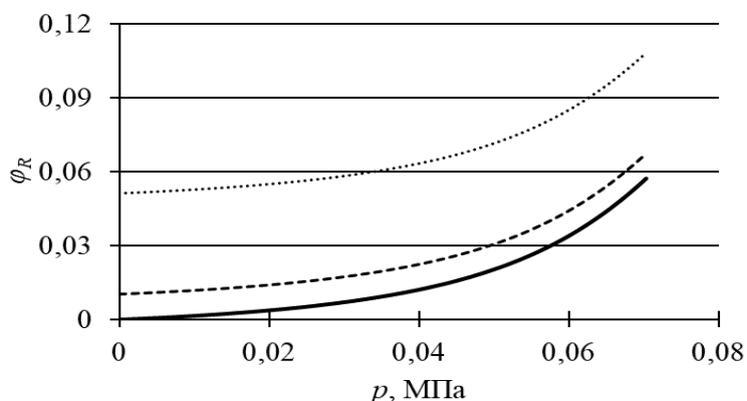


Рисунок 24. Коэффициент сопротивления движению гусеничного движителя в зависимости от среднего давления по пятну контакта [рисунок авторов]

Figure 24. The coefficient of resistance to the movement of the crawler depending on the average pressure along the contact spot

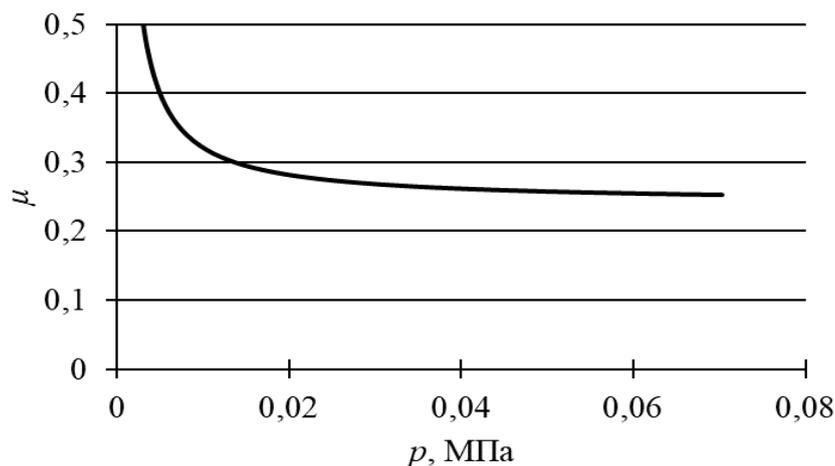


Рисунок 25. Коэффициент сцепления гусеничного движителя в зависимости от среднего давления по пятну контакта [рисунок авторов]

Figure 25. The coefficient of adhesion of the crawler depending on the average pressure along the contact spot

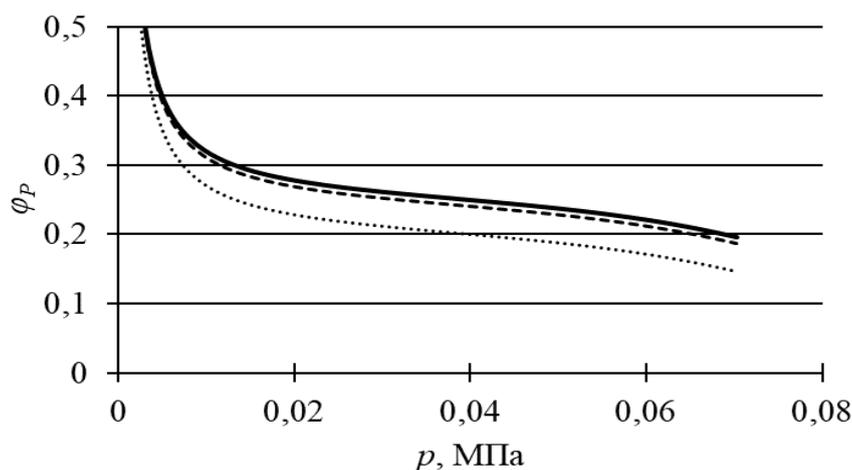


Рисунок 26. Коэффициент тяги гусеничного движителя в зависимости от среднего давления по пятну контакта [рисунок авторов]

Figure 26. The coefficient of traction of the crawler depending on the average pressure along the contact spot

Отмечаются стабилизация значения коэффициента сцепления и линейный характер изменения коэффициентов сопротивления движению и тяги при давлении p свыше 0,02 МПа.

На рисунке 27 представлены результаты расчётов мощности, требуемой для поступательного движения машины со скоростью 5 км/ч, отнесённой к единичному гусеничному движителю.

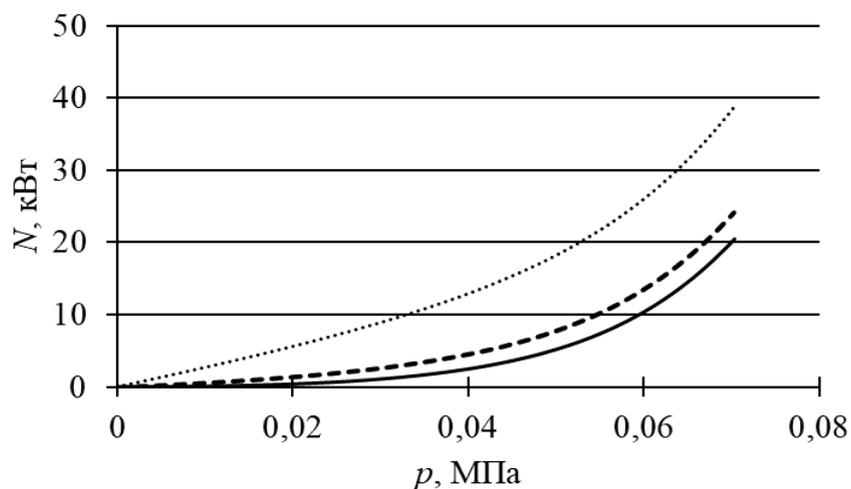


Рисунок 27. Мощность, отнесённая к единичному гусеничному движителю, требуемая для поступательного движения машины [рисунок авторов]

Figure 27. The power attributed to a single crawler required for the forward movement of the machine

Далее проиллюстрируем результаты выполненных расчётов относительно глубины образующейся колеи h . На рисунках 28—30 представлены графики оценок тягово-цепных свойств гусеничного движителя.

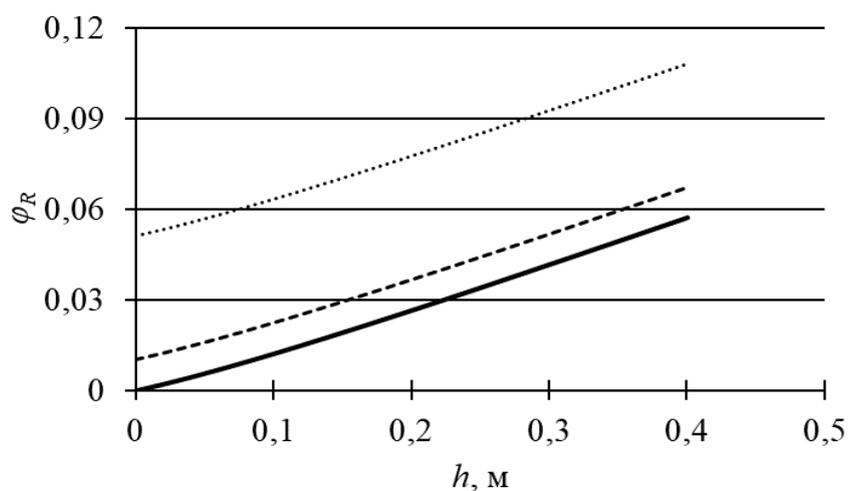


Рисунок 28. Коэффициент сопротивления движению гусеничного движителя в зависимости от глубины образующейся колеи [рисунок авторов]

Figure 28. The coefficient of resistance to the movement of the crawler depending on the depth of the formed track

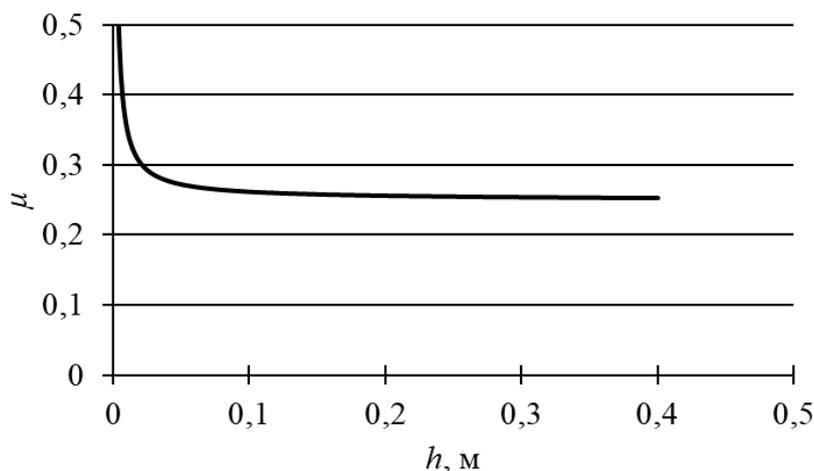


Рисунок 29. Коэффициент сцепления гусеничного движителя в зависимости от глубины образующейся колеи [рисунок авторов]

Figure 29. The coefficient of adhesion of the crawler depending on the depth of the formed track

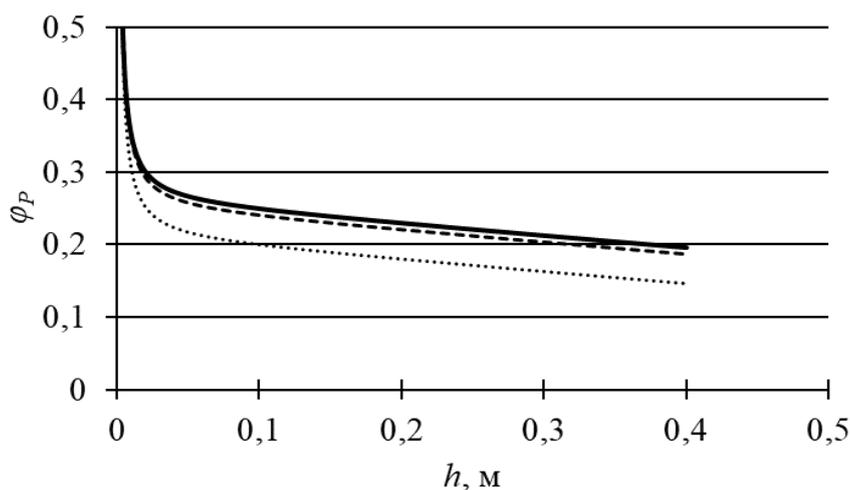


Рисунок 30. Коэффициент тяги гусеничного движителя в зависимости от глубины образующейся колеи (почвогрунт средней прочности) [рисунок авторов]

Figure 30. The coefficient of traction of the crawler depending on the depth of the formed track (medium strength soil)

Как и в случае колёсного движителя, по мере развития колеи h снижается оценка проходимости гусеничной пары. Однако даже при глубине колеи h свыше 0,2 м коэффициент тяги φ_P остаётся положительным. Таким образом, математическая модель не прогнозирует потерю проходимости гусеничной пары при превышении «порогового» значения $h = 0,2$ м.

Рассмотрим данные, полученные при расчёте требуемой мощности (рисунок 31).

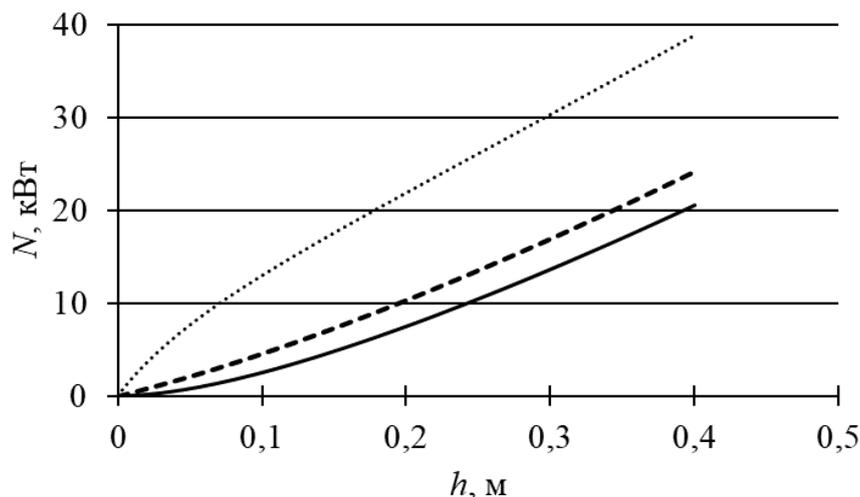


Рисунок 31. Сопоставление требуемой мощности двигателя, отнесённой к единичному гусеничному движителю, и глубины колеи [рисунок авторов]

Figure 31. Comparison of the required engine power attributed to a single tracked engine and track depth

В данном случае расчёт показывает, что требуемая мощность изменяется в 2—3 раза при глубине колеи $h = 0,2$ м. Таким образом, при обосновании параметров комбинированной машины следует предусмотреть коэффициент запаса мощности двигателя для обеспечения поступательного движения гусеничной пары.

Критерий экологической безопасности, ограничивающий глубину колеи, должен выполняться и для гусеничного движителя, по этой причине рассмотрим показатели при варьировании механических свойств лесного почвогрунта при фиксированном значении глубины. Для проведения расчётов использована разработанная программа.

Поскольку гусеничный движитель проходит вслед за колёсным, для него предельная глубина колеи не может приниматься равной $h = 0,2$ м. Вопрос об ограничении нагрузки со стороны гусеничного движителя будет рассмотрен далее. Здесь же для иллюстрации примем $h = 0,2$ м с целью получить сведения для «предельного» случая, чтобы получить оценки тягово-сцепных свойств и требуемой мощности в наихудшем случае.

На рисунке 32 приведены результаты расчётов несущей способности p_s лесного почвогрунта, находящегося под воздействием гусеничного движителя с учётом образовавшейся колеи.

Сравним результаты с колёсным движителем (см. рисунок 14), данные представлены на рисунке 33.

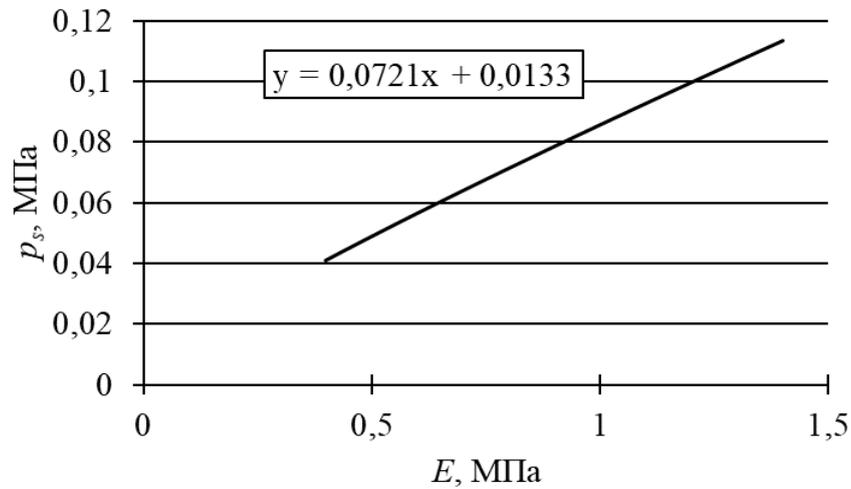


Рисунок 32. Несущая способность почвогрунта под воздействием гусеничного движителя с учётом образующейся колеи глубиной 0,2 м [рисунок авторов]

Figure 32. The bearing capacity of the soil under the influence of a caterpillar mover, taking into account the resulting track depth of 0.2 m

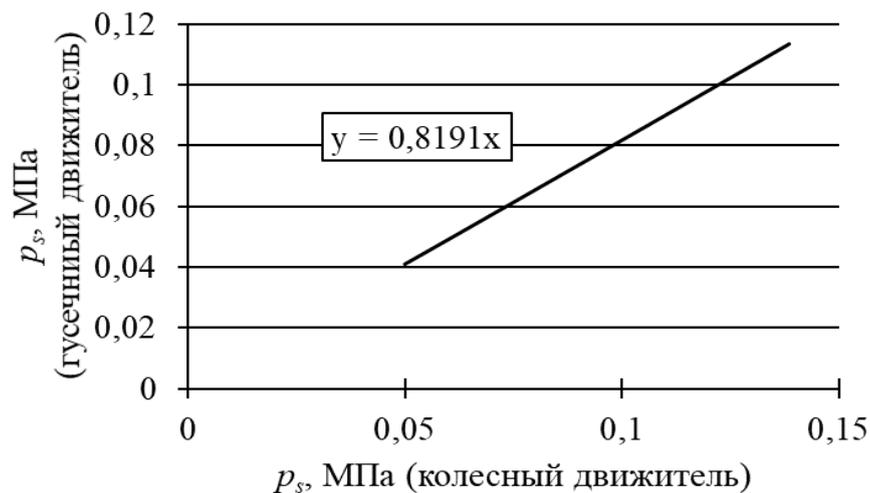


Рисунок 33. Сопоставление несущей способности почвогрунта, находящегося под воздействием гусеничного и колёсного движителя с учётом образующейся колеи [рисунок авторов]

Figure 33. Comparison of the bearing capacity of a soil under the influence of a tracked and wheeled propulsion system, taking into account the resulting track

Сравнение показывает, что оценка несущей способности почвогрунта, находящегося под воздействием гусеничного движителя, составляет ориентировочно 80 % от оценки несущей способности почвогрунта, находящегося под воздействием колёсного движителя. Различие объясняется соотношением сторон пятна контакта, это обстоятельство отмечалось ранее [23], однако числовая оценка не проводилась.

Для общего случая приведём результаты расчёта давления p , при котором глубина колеи h , образующейся под воздействием гусеничного движителя, не превысит 0,2 м (рисунок 34).

Результаты расчёта представим линейной зависимостью:

$$p = 0,001 + 0,0544E, \quad (16)$$

которая в практических расчётах может использоваться для приближённой, верхней оценки допустимого давления гусеничного движителя.

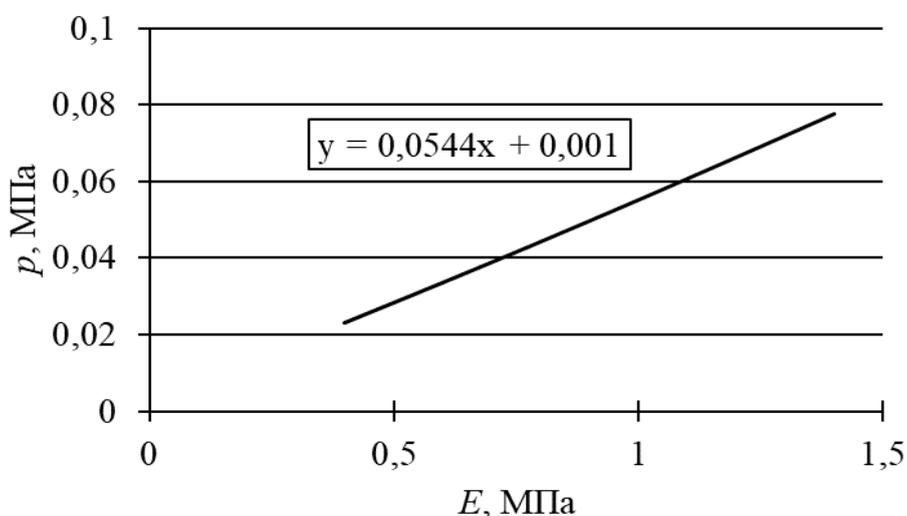


Рисунок 34. Верхняя оценка допустимого давления гусеничного движителя на лесной почвогрунт [рисунок авторов]

Figure 34. The upper estimate of the permissible pressure of the crawler on the forest soil

При принятых исходных данных к расчёту такой верхней оценке давления будет соответствовать вес, отнесённый к единичному гусеничному движителю, по формуле (рисунок 35)

$$w = 0,0036 + 0,1902E, \quad (17)$$

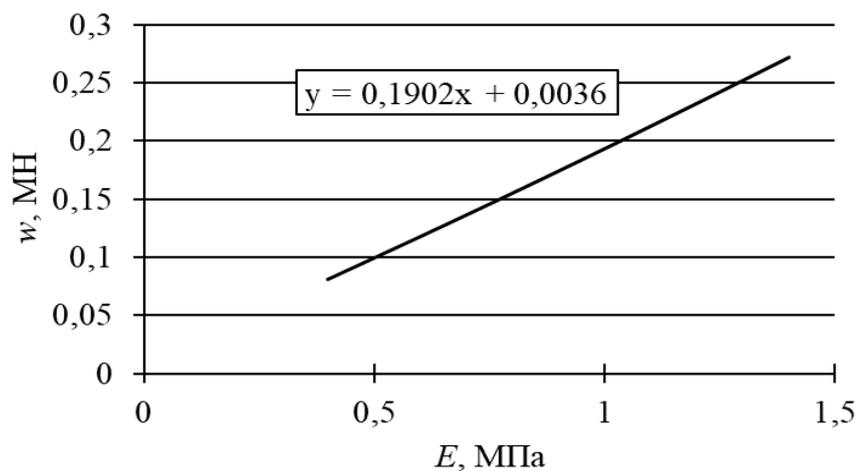


Рисунок 35. Верхняя оценка допустимого веса гусеничного движителя, ограниченного глубиной колеи 0,2 м [рисунок авторов]

Figure 35. The upper estimate of the permissible weight of a tracked vehicle, limited by a track depth of 0.2 m

Результаты расчёта тягово-сцепных свойств гусеничного движителя, с учётом образующейся колеи, приведены на рисунках 36—38.

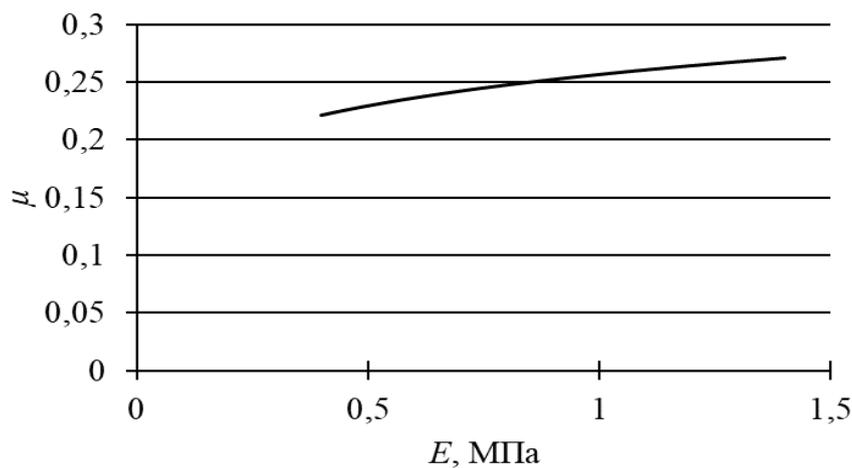


Рисунок 36. Коэффициент сцепления гусеничного движителя с почвогрунтом с учётом образующейся колеи глубиной 0,2 м [рисунок авторов]

Figure 36. The coefficient of adhesion of the crawler to the soil, taking into account the resulting track depth of 0.2 m

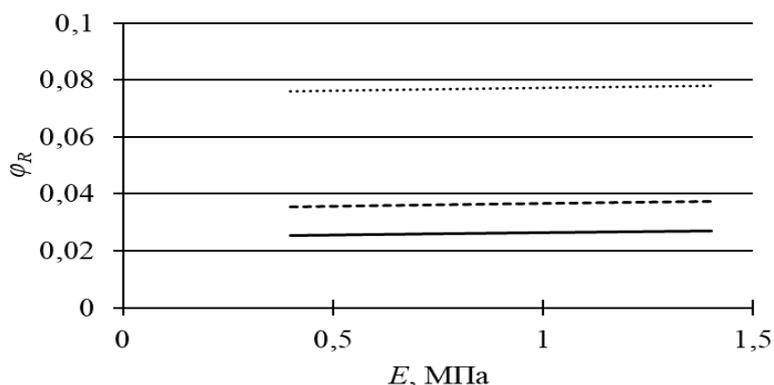


Рисунок 37. Коэффициент сопротивления движению гусеничного движителя, с учётом образующейся колеи глубиной 0,2 м, при различной липкости почвогрунта [рисунок авторов]

Figure 37. The coefficient of resistance to the movement of the crawler, taking into account the resulting track depth of 0.2 m with different stickiness of the soil

Отметим, что при глубине колеи $h = 0,2$ м коэффициент сопротивления движению практически не зависит от модуля деформации E почвогрунта, однако заметно влияние липкости λ (разметка линий на графике та же, что и на рисунке 23, сплошной линии соответствует случай, когда липкость не учитывается).

На рисунке 38 представлены графики мощности, обеспечивающей поступательное движение гусеничного движителя со скоростью 5 км/ч с учётом максимальной глубины колеи 0,2 м и липкости почвогрунта.

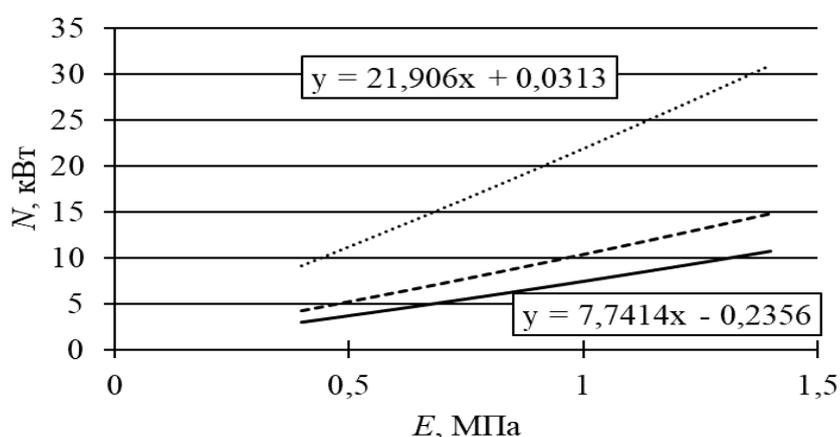


Рисунок 38. Мощность, обеспечивающая поступательное движение гусеничного движителя с учётом образующейся колеи [рисунок авторов]

Figure 38. The power ensuring the forward movement of the crawler taking into account the resulting track

Обработка расчётных данных позволила получить линейные уравнения для приближённой оценки требуемой мощности N без учёта липкости почвогрунта:

$$N = -0,2356 + 7,7414E, \quad (18)$$

а также для «наихудшего» случая, когда липкость лесного почвогрунта сопоставима с липкостью глинистого почвогрунта:

$$N = 0,0313 + 21,906E \quad (19)$$

Полученные данные позволяют сделать вывод об опорной проходимости гусеничного движителя в случае, если приходящийся на него вес w ограничен глубиной колеи $h = 0,2$ м. Результаты расчёта коэффициента тяги φ_P приведены на рисунке 39.

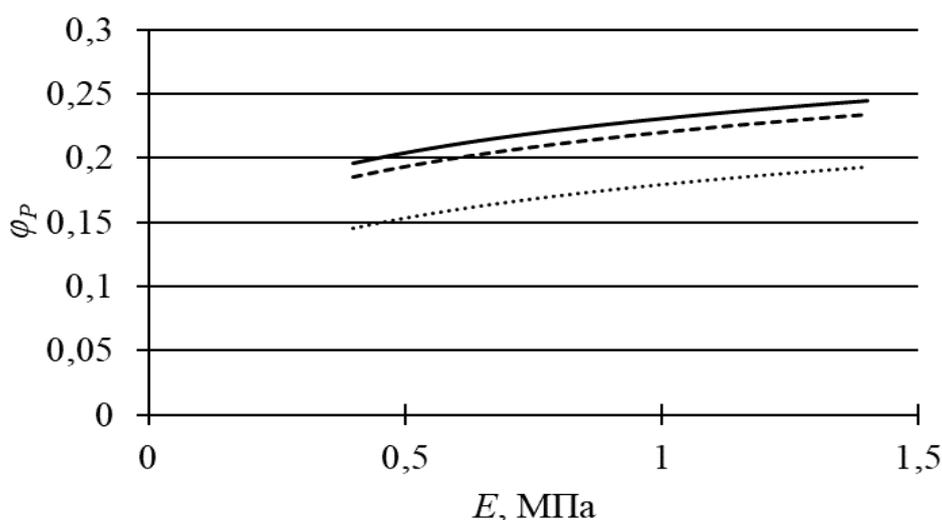


Рисунок 39. Коэффициент тяги гусеничного движителя с учётом образующейся колеи глубиной 0,2 м [рисунок авторов]

Figure 39. The coefficient of traction of the crawler, taking into account the resulting track depth of 0.2 m

Результаты расчётов показывают, что коэффициент тяги гусеничного движителя положителен в рассмотренном диапазоне изменения модуля E и липкости λ . Таким образом, при глубине колеи, не превышающей 0,2 м, обеспечивается опорная проходимость гусеничного движителя даже при верхней оценке липкости почвогрунта (глинистый почвогрунт).

Полученные результаты позволяют сделать выводы:

- Для гусеничной пары глубина колеи свыше 0,2 м не ограничивает опорную проходимость. Однако с учётом критерия экологической безопасности должна быть ограничена суммарная глубина колеи. Для единичного гусеничного движителя верхняя

оценка мощности задаётся формулой (19), полученной при допущении, что липкость лесного почвогрунта соответствует липкости глинистого грунта. В дальнейшем потребуется уточнение сведений о липкости лесного почвогрунта.

3.3. Распределение веса между колёсной и гусеничной парами

В заключительной части статьи рассмотрим вопрос о распределении веса лесной машины между колёсной и гусеничной парами. Для проведения расчётов разработана программа.

Суть расчёта заключается в следующем. При заданных параметрах движителя (колёсного и гусеничного) и свойствах лесного почвогрунта (определяемых модулем общей деформации E) выполняется расчёт веса w_k , приходящегося на единственный колёсный движитель, при котором глубина образующейся колеи не превысит определённого значения h_k . Далее, глубина колеи, образующейся при последующем проходе гусеничного движителя h_r , определяется как разность допустимого значения h и h_k . При полученном значении h_r определяется соответствующий вес w_r . Расчёт ведётся с заданным шагом изменения h_k . Затем для полученных расчётных данных численно решается оптимизационная задача относительно массы машины M , выраженной через вес W :

$$\begin{cases} W = 2 \cdot (w_k + w_r) \\ q = \frac{w_k}{w_k + w_r} \cdot 100\% \\ M = M(W, q) = M(q) \\ q_{\text{опт}} = \operatorname{argmax} M(q) \end{cases} \quad (20)$$

Решение (20) задаёт оптимальное соотношение веса между колёсной и гусеничной парами, максимизирующее суммарный вес машины, при котором соблюдается критерий экологичности. Очевидно, что проходимость обеих пар при этом обеспечивается; для подбора мощности двигателя машины на настоящем этапе исследования пригодны верхние оценки — формулы (12), (19). При невозможности соблюсти оптимальное соотношение q масса машины M подбирается исходя из вида функции $M = M(q)$.

Приведём результаты расчётов, полученные для слабого почвогрунта III категории ($E = 0,4$ МПа) и более прочного почвогрунта II категории ($E = 1,0$ МПа). Доля веса комбинированной машины, приходящаяся на колёсную пару, в зависимости от глубины колеи, образовавшейся после её прохода, проиллюстрирована графиками на рисунках 40, 41 соответственно.

На рисунках 42 и 43 приведены графики допустимой массы машины, ограниченной суммарной глубиной колеи, с учётом распределения нагрузки между колёсной и гусеничной парами.

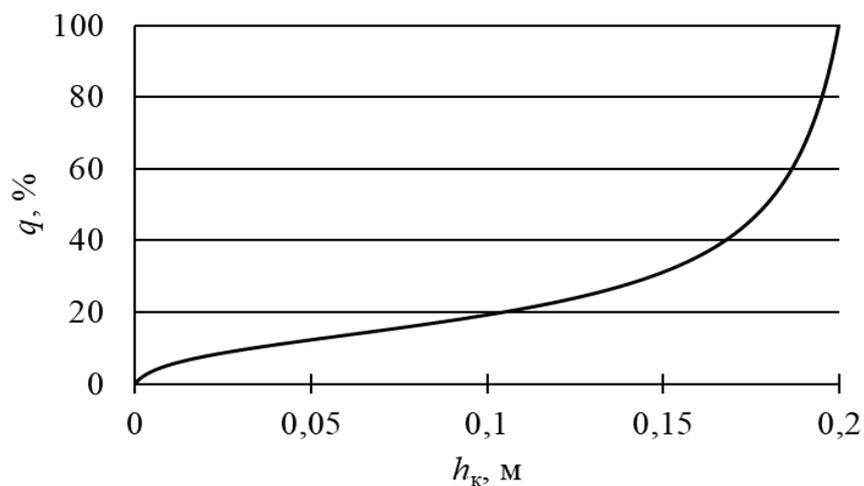


Рисунок 40. Доля веса комбинированной машины, приходящаяся на колёсную пару (слабый почвогрунт III категории) [рисунок авторов]

Figure 40. Weight percentage of combined vehicle weight per a wheelset (weak soil of category III)

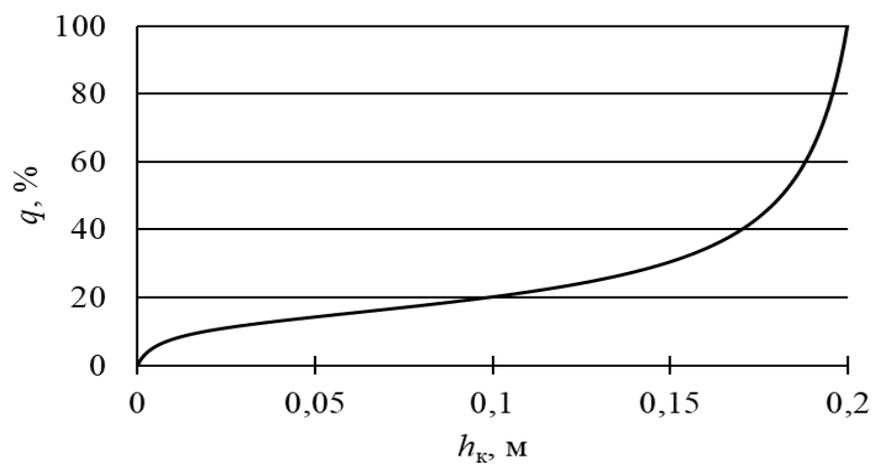


Рисунок 41. Доля веса колёсно-гусеничной машины, приходящаяся на колёсную пару (почвогрунт средней прочности II категории) [рисунок авторов]

Figure 41. Weight percentage of the wheeled caterpillar vehicle weight per a wheelset (medium strength soil of category II)

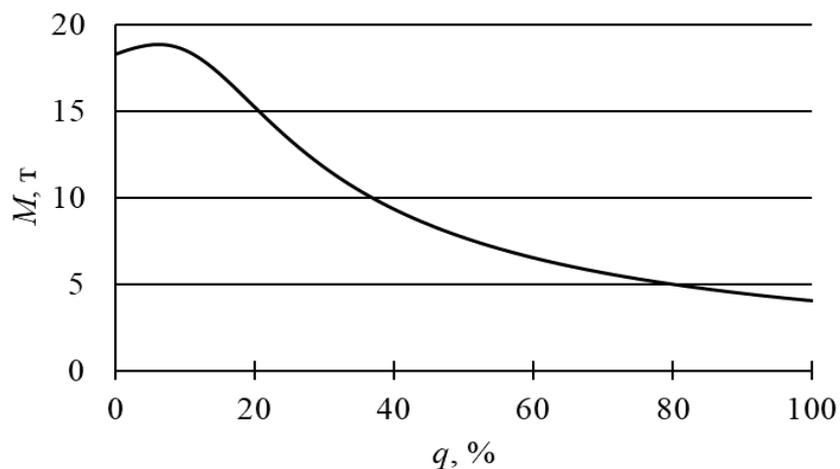


Рисунок 42. Допустимая масса машины, ограниченная суммарной глубиной колеи, с учётом распределения нагрузки между колёсной и гусеничной парами (слабонесущий почвогрунт) [рисунок авторов]

Figure 42. The permissible weight of the machine, limited by the total depth of the track, taking into account the load distribution between the wheeled and tracked pairs (low-bearing soil)

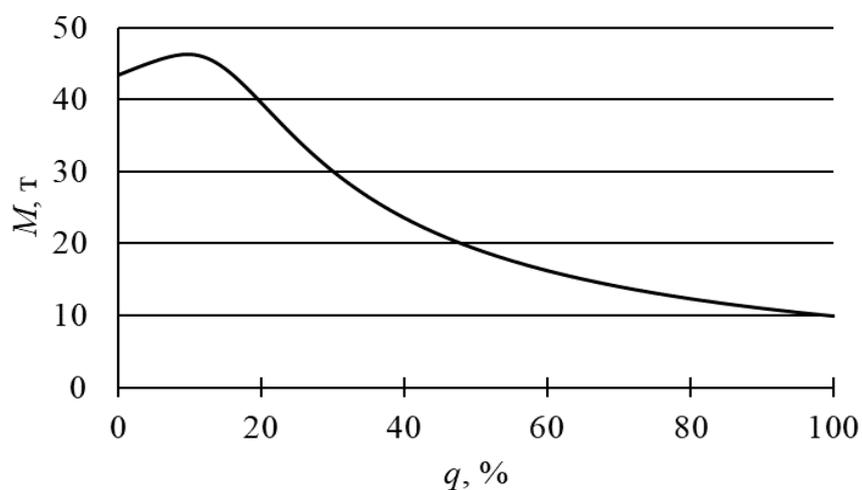


Рисунок 43. Допустимая масса машины, ограниченная суммарной глубиной колеи, с учётом распределения нагрузки между колёсной и гусеничной парами (почвогрунт средней прочности) [рисунок авторов]

Figure 43. The permissible weight of the machine, limited by the total depth of the track, taking into account the load distribution between the wheeled and tracked pairs (medium-strength soil)

Численное решение оптимизационной задачи (20) при варьировании модуля деформации лесного почвогрунта позволило установить функцию оптимальной доли веса машины, приходящегося на колёсную пару (рисунок 44):

$$q_{\text{опт}} = 2,3977 + 11,225E - 3,7736E^2, \quad (21)$$

а также получить оценку массы машины M_{max} , ограниченной суммарной глубиной колеи $h = 0,2$ м при $q = q_{\text{опт}}$ (рисунок 45):

$$M_{\text{max}} = -0,4294 + 47,169E \quad (22)$$

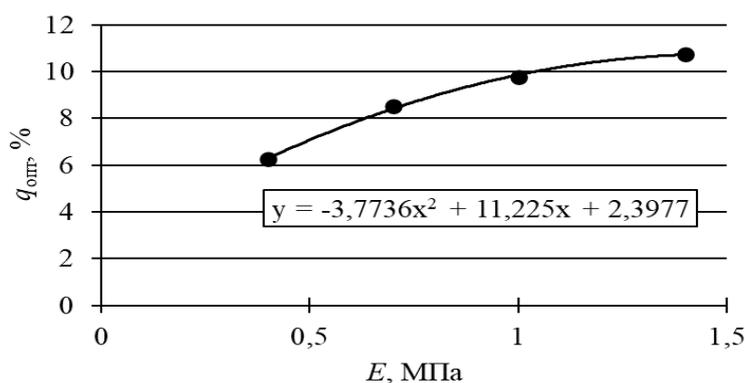


Рисунок 44. Оптимальная доля веса комбинированной машины, приходящегося на колёсную пару [рисунок авторов]

Figure 44. The optimal weight percentage of the combined machine's weight per a wheelset

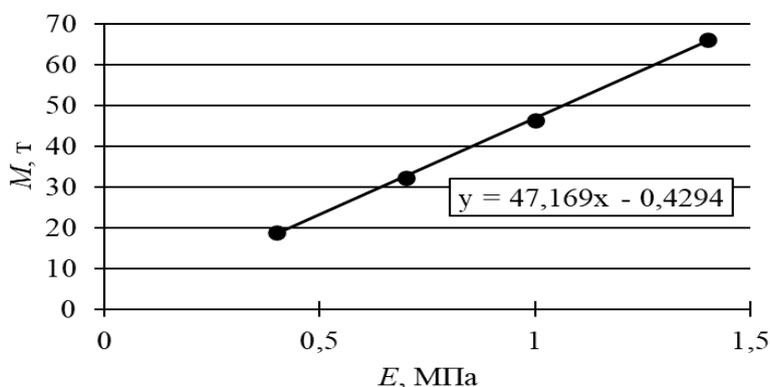


Рисунок 45. Допустимая масса колёсно-гусеничной машины при оптимальном распределении веса между колёсной и гусеничной парами [рисунок авторов]

Figure 45. The permissible weight of a wheeled caterpillar vehicle with an optimal weight distribution between the wheeled and tracked pairs

Для более общего случая, предполагающего значительное варьирование геометрических параметров движителей, в последующих разработках могут быть полезны результаты, устанавливающие допустимое давление по пятну контакта p , при котором суммарная глубина колеи не превысит 0,2 м (графики на рисунках 46, 47 соответственно).

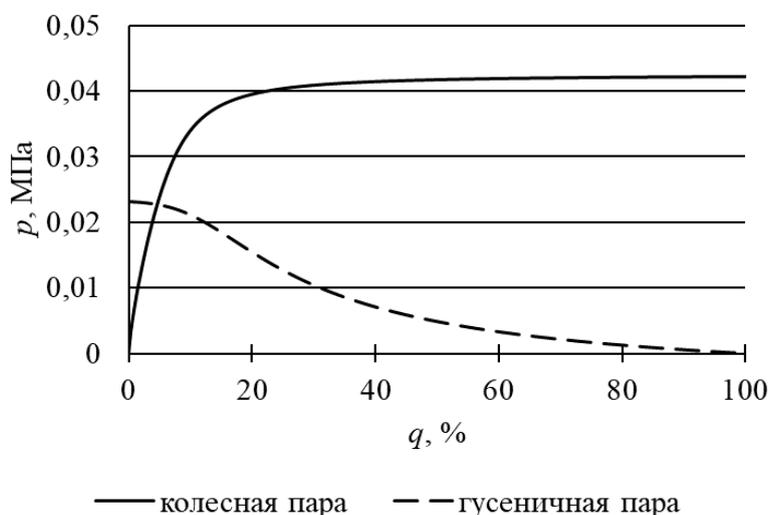


Рисунок 46. Допустимое среднее давление по пятну контакта, ограниченное суммарной глубиной колеи (слабонесущий почвогрунт) [рисунок авторов]

Figure 46. The permissible average pressure along the contact spot, limited by the total depth of the track (weakly bearing soil)

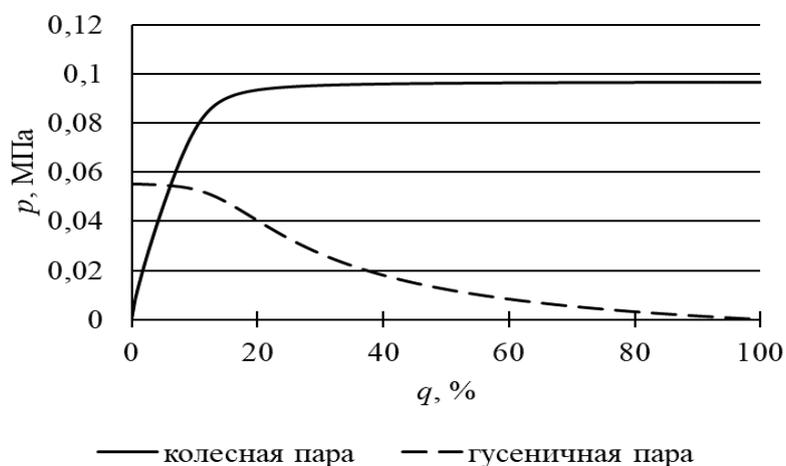


Рисунок 47. Допустимое среднее давление по пятну контакта, ограниченное суммарной глубиной колеи (почвогрунт средней прочности) [рисунок авторов]

Figure 47. The permissible average pressure along the contact spot, limited by the total depth of the track (medium-strength soil)

4. Выводы

Основные выводы, сделанные по результатам представленных исследований:

- Для колёсно-гусеничной машины вес, приходящийся на колёсную пару, должен быть ограничен таким образом, чтобы глубина колеи, образующейся после её прохода, не превысила 0,2 м. В противном случае опорная проходимость колёсной пары не обеспечивается. Оценка веса, отнесённого к единичному колёсному движителю, при стандартных параметрах представлена формулой (10). Для более общего случая при варьировании параметров движителя получена предельно допустимая оценка среднего давления — формула (11).

- Мощность двигателя машины, отнесённая к единичному колёсному движителю, при глубине колеи 0,2 м определяется формулой (12). Формула (12) может использоваться на практике как верхняя оценка требуемой мощности.

- Для гусеничной пары глубина колеи свыше 0,2 м не ограничивает опорную проходимость. Однако с учётом критерия экологической безопасности должна быть ограничена суммарная глубина колеи. Для единичного гусеничного движителя верхняя оценка мощности задаётся формулой (19), полученной при допущении, что липкость лесного почвогрунта соответствует липкости глинистого почвогрунта. При дальнейших исследованиях потребуется уточнение сведений о липкости лесного почвогрунта.

- При условии соблюдения критерия экологичности оптимальное распределение веса между колёсной и гусеничной парами комбинированной машины задаётся формулой (21). При этом масса машины, ограниченная суммарной глубиной колеи после прохода колеса, а затем гусеницы, оценивается по формуле (22). При невозможности соблюсти оптимальное соотношение рекомендуется пользоваться графиками (рисунок 42, 43) либо разработанной программой, позволяющими определить допустимую массу колёсно-гусеничной машины при произвольном распределении веса между парами.

- Результаты получены для типовых параметров колёсного и гусеничного движителей (ширина и диаметр колеса 0,7 м и 1,333 м соответственно, давление в шине 0,35 МПа; ширина и длина проекции гусеницы на грунт 0,7 м и 5,0 м соответственно). Для дальнейших исследований (например, по обоснованию параметров малогабаритных колёсно-гусеничных машин) получены более общие результаты, связывающие допустимое среднее давление для колёсной и гусеничной пары (рисунки 46, 47).

- Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение тягово-сцепных свойств лесных машин, работающих в условиях крутых склонов (с учётом существенного отклонения нагрузки от нормали к поверхности почвогрунта и вызванного этим отклонением снижения несущей способности). Кроме того, отдельное направление исследований составляет обоснование параметров машин с учётом не только профильной, но и опорной проходимости.

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

Список литературы

1. Григорьев И. В., Григорьева О. И., Чураков А. А. Эффективные технологии и системы машин для малообъёмных заготовок древесины // Энергия: экономика, техника, экология. 2018. № 2. С. 61—66.
2. 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.
3. Григорьев И. В. Повышение эффективности освоения лесосечного фонда малой концентрации // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Второй Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием, посвящённой 65-летию высшего лесного образования в Республике Карелия. Петрозаводск, 2016. С. 62—65.
4. Григорьев И. В., Григорьева О. И., Нгуен Ф. З. Система машин и технология работ для малообъёмных лесозаготовок // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Третьей Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2017. С. 51—53.
5. Технология и машины лесовосстановительных работ / Р. Р. Сафин, И. В. Григорьев, О. И. Григорьева [и др.]. М.: Деревообрабатывающая пром-сть, 2015. 230 с.
6. Григорьев И. В., Григорьева О. И., Вернер Н. Н. Системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5, № 5 (31). С. 438—443.
7. 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.
8. Григорьева О. И., Нгуен Ф. З. Лесные плантации для сырьевого обеспечения // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Третьей Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2017. С. 59—61.
9. 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.
10. Добрецов Р. Ю., Григорьев И. В. Перспективные трансмиссии лесных гусеничных машин // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Четвёртой Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2018. С. 57—58.
11. 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 Землеустройства Якутии и Году науки и технологий. Якутск, 2021. С. 271—278.
12. Рудов С. Е., Григорьева О. И., Григорьев И. В. Эффективное восстановление лесов на вечной мерзлоте // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: Материалы

- 86-й научно-техн. конф профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с междунар. участием). Минск, 2022. С. 38—41.
13. 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.
 14. Давтян А. Б., Григорьева О. И., Григорьев И. В. Энергетические лесные плантации для эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения в РФ // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: Материалы 86-й научно-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с междунар. участием). Минск, 2022. С. 42—45.
 15. Заикин А. Н., Макуев В. А. История оборудования для трелёвки леса. Брянск: БГИТА, 2014. 111 с.
 16. Григорьева О. И., Панарин А. О. Повышение эффективности ухода за лесом // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Девятой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2023. С. 61—62.
 17. Григорьева О. И., Панарин А. О. Перспективные пути повышения эффективности рубок ухода в молодняках // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: Материалы Всерос. научно-практич. конф. / Под ред. Ю. М. Казакова [и др.]. Казань, 2023. С. 70—73.
 18. Григорьева О. И. Перспективные направления повышения эффективности проведения рубок ухода за лесом // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Третьей Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2017. С. 56—58.
 19. Григорьева О. И., Нгуен Ф. З. Перспективная техника для проведения рубок ухода за лесом // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: Материалы научно-техн. конф. Санкт-Петербург, 2016. С. 112—114.
 20. Григорьева О. И. Повышение эффективности проведения рубок ухода за лесом // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Второй Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием, посвящённой 65-летию высшего лесного образования в Республике Карелия. Петрозаводск, 2016. С. 70—73.
 21. Григорьева О. И. Новая машина для очистки лесосек // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 5-3 (10-3). С. 96—99.
 22. Теоретическое обоснование параметров движителя колёсно-гусеничной лесной машины / А. С. Дмитриев, И. С. Должиков, О. А. Куницкая [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 1 (61). С. 163—170.
 23. Хитров Е. Г. Комплексное обоснование параметров и режимов работы движителей лесных машин: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2020. 319 с.
 24. 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.
 25. Хитров Е. Г., Григорьев И. В., Хахина А. М. Повышение эффективности трелёвки обоснованием показателей работы лесных машин при оперативном контроле свойств почвогрунта. СПб., 2015. 146 с.
 26. 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.
 27. 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.
28. Особенности лесных почвогрунтов криолитозоны как объекта воздействия движителей лесных машин / В. А. Каляшов, И. В. Григорьев, В. А. Иванов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 4 (60). С. 94—101.
29. Rego G. E., Voronov R. V., Grigoreva O. I. Algorithms for calculating schemes of transport routes in a felling area // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2. Series «II All-Russian Scientific-Technical Conference "Digital Technologies in Forest Sector"». Saint Petersburg, 2021. P. 012025.
30. 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.
31. Каляшов В. А., Григорьев И. В., Григорьева О. И. Сравнительный анализ видов трелёвки на горных склонах // Вестник АГАТУ. 2022. № 2 (6). С. 41—59.
32. 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.
33. Григорьев И. В., Григорьева О. И. Повышение экологической эффективности лесохозяйственного производства // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 3-4 (8-4). С. 51—55.

References

1. Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Churakov A. A. Effective technologies and machine systems for low-volume wood blanks. *Energy: economics, technology, ecology*, 2018, no. 2, pp. 61—66. (In Russ.)
2. 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.)
3. Grigorev I. V. Improving the efficiency of the development of a low-concentration logging fund. *Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the Second All-Russian Scientific and Practical conference with international participation dedicated to the 65th anniversary of higher forest education in the Republic of Karelia*. Petrozavodsk, 2016, pp. 62—65. (In Russ.)
4. Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Nguyen F. Z. Machine system and technology of work for low-volume logging. *Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the third All-Russian scientific and practical conference with international participation*. Petrozavodsk, 2017, pp. 51—53. (In Russ.)
5. Safin R. R., Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Razumov E. Y. Technology and machines of reforestation. Moscow, Woodworking industry, 2015. 230 p. (In Russ.)
6. Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Werner N. N. Systems of machines for the creation and operation of forest plantations. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2017, vol. 5, no. 5 (31), pp. 438—443. (In Russ.)
7. Grigoreva O. I., Makuyev V. A., Baryshnikova E. V., Burmistrova O. N., Shvetsova V. V., Grigorev I. V., Ivanov V. A. Prospects for import substitution of machine systems for artificial reforestation. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 3 (55), pp. 78—84. (In Russ.)

8. Grigoreva O. I., Nguyen F. Z. Forest plantations for raw materials supply. *Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the third All-Russian scientific and practical conference with international participation*. Petrozavodsk, 2017, pp. 59—61. (In Russ.)
9. Grigorev I. V., Rudov S. E. Features of operation of wheeled forest machines in difficult soil-soil and relief conditions. *Forest Engineering. materials of the scientific and practical conference with international participation*. Yakutsk, 2018, pp. 67—71. (In Russ.)
10. Dobretsov R. Yu., Grigorev I. V. Perspective transmissions of forest tracked vehicles. *Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the IV All-Russian scientific and practical conference with international participation*. Petrozavodsk, 2018, pp. 57—58. (In Russ.)
11. Grigorev I. V., Davtyan A. B., Grigoreva O. I. The choice of a machine system for the creation and operation of forest plantations. *Land management, land management, cadastre, geodesy and cartography. Problems and prospects of development: A 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.)
12. Rudov S. E., Grigoreva O. I., Grigorev I. V. Effective restoration of forests on permafrost. *Forest engineering, materials science and design: Materials of the 86th Scientific and technical Conference of faculty, researchers and postgraduates (with international participation)*. Minsk, 2022, pp. 38—41. (In Russ.)
13. 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.)
14. Davtyan A. B., Grigoreva O. I., Grigorev I. V. Energy forest plantations for effective involvement in the turnover of agricultural land in the Russian Federation. *Forest engineering, materials science and design: Materials of the 86th Scientific and technical Conference of faculty, researchers and postgraduates (with international participation)*. Minsk, 2022, pp. 42—45. (In Russ.)
15. Zaikin A. N., Makuyev V. A. The history of equipment for forest skidding. Bryansk, BGITA, 2014. 111 p. (In Russ.)
16. Grigoreva O. I., Panarin A. O. Improving the efficiency of forest care. *Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the Ninth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2023, pp. 61—62 (In Russ.)
17. Grigoreva O. I., Panarin A. O. Promising ways to improve the efficiency of logging care in young trees. *Actual problems of forestry and wood processing: Materials of the All-Russian scientific and practical conference*. Edited by Yu. M. Kazakov [et al.]. Kazan, 2023, pp. 70—73. (In Russ.)
18. Grigoreva O. I. Promising directions for improving the efficiency of logging of forest care. *Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the third All-Russian scientific and practical conference with international participation*. Petrozavodsk, 2017, pp. 56—58. (In Russ.)
19. Grigoreva O. I., Nguyen F. Z. Promising equipment for logging forest care. *Forests of Russia: politics, industry, science, education: Materials of the scientific and technical conference*. Saint Petersburg, 2016, pp. 112—114. (In Russ.)
20. Grigoreva O. I. Improving the efficiency of logging of forest care. *Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the Second All-Russian Scientific and Practical conference with international participation dedicated to the 65th anniversary of higher forest education in the Republic of Karelia*. Petrozavodsk, 2016, pp. 70—73. (In Russ.)

21. Grigoreva O. I. A new machine for clearing cutting areas. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2014, vol. 2, no. 5-3 (10-3), pp. 96—99. (In Russ.)
22. Dmitriev A. S., Dolzhikov I. S., Kunitskaya O. A., Khitrov E. G., Dyachenko V. M., Shvetsov A. S. Theoretical substantiation of the parameters of the propulsion of a wheeled tracked forest machine. *Systems. Methods. Technologies*, 2024, no. 1 (61), pp. 163—170. (In Russ.)
23. Khitrov E. G. Comprehensive justification of parameters and modes of operation of propellers of forest machines: Dis. ... Doctor of Technical Sciences: 05.21.01. Voronezh, 2020. 319 p. (In Russ.)
24. Nikiforova A. I., Grigoreva O. I. Modeling of the impact of forest machinery movers on the soils of logging 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.)
25. Khitrov E. G., Grigorev I. V., Khakhina A. M. Improving the efficiency of skidding by substantiating the performance of forest machines in the operational control of soil properties. Saint Petersburg, 2015. 146 p. (In Russ.)
26. Grigorev I. V. Parameters and performance indicators of a promising forwarder for low-volume logging. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2018, vol. 6, no. 4 (40), pp. 21—25. (In Russ.)
27. Grigorev I. V., Churakov A. A. Improvement of 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. by N. S. Zakharov. Tyumen, 2018, pp. 84—88. (In Russ.)
28. Kalyashov V. A., Grigorev I. V., Ivanov V. A., Yudilevich A. M., Burmistrova O. N., Okhlopkova M. K., Grigoreva O. I. Features of forest soils of the cryolithozone as an object of influence of propellers of forest machines. *The system. Methods. Technologies*, 2023, no. 4 (60), pp. 94—101. (In Russ.)
29. Rego G. E., Voronov R. V., Grigoreva O. I. Algorithms for calculating schemes of transport routes in a felling area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2. Series «II All-Russian Scientific-Technical Conference "Digital Technologies in Forest Sector"»*, Saint Petersburg, 2021, p. 012025.
30. Grigoreva O. I., Grinko O. I., Nikolaeva F. V. Forest fire transport and technological complexes based on wheeled forwarders. *Transport and transport-technological systems: Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Ed. by N. S. Zakharov. Tyumen, 2021, pp. 55—58. (In Russ.)
31. Kalyashov V. A., Grigorev I. V., Grigoreva O. I. Comparative analysis of types of skidding on mountain slopes. *Herald of AGATHU*, 2022, no. 2 (6), pp. 41—59. (In Russ.)
32. 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. *In the collection: Science, education, innovation in the border region: Materials of the republican scientific and practical conference*. Petrozavodsk, 2015, pp. 7—9. (In Russ.)
33. Grigorev I. V., Grigoreva O. I. Improving the environmental efficiency of forestry production. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2014, vol. 2, no. 3-4 (8-4), pp. 51—55. (In Russ.)

DOI: 10.15393/j2.art.2024.8043
УДК 681.518.5:(631.12+631.3.076)

Статья

Способ и процессная модель предварительной обработки данных автоматизированных систем контроля технического состояния зерноуборочных комбайнов

Помогаев Виталий Михайлович

кандидат экономических наук, доцент, Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина (Российская Федерация), vt.pomogaev@omgau.org

Ревякин Павел Игоревич

аспирант, Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина (Российская Федерация), pi.revyakin@omgau.org

Басакина Анна Сергеевна

аспирант, Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина (Российская Федерация), as.basakina@omgau.org

Получена: 31 июля 2024 / Принята: 15 октября 2024 / Опубликовано: 2 ноября 2024

Аннотация: Современные самоходные сельскохозяйственные машины отличаются своей технологичностью, сложностью и высокой стоимостью. Обеспечение надёжности и работоспособности таких машин является ключевой задачей технического сервиса. Развитие технологий технического сервиса позволяет собирать, обрабатывать и строить прогнозы технического состояния машин на основе данных, получаемых в процессе их эксплуатации. Сбор данных осуществляется встроенными системами контроля, с помощью которых происходит диагностирование и оперативное выявление неисправностей в работе узлов и агрегатов машин. Целью исследования являлась разработка и апробация способа предварительной обработки данных, полученных с помощью автоматической системы контроля технического состояния и датчиков, установленных на зерноуборочных комбайнах ACROS, и формализация разработанного алгоритма для последующей автоматизации процесса подготовки данных для технического анализа. Качество данных оценивалось по следующим критериям: объём данных, типы данных, количество атрибутов, наличие и количество пропусков, наличие дубликатов, наличие аномалий, соответствие

категорий, нормализация и согласованность значений, возможная гомогенность, сегментация. В качестве инструментов использованы Python, R, библиотеки Pandas, NumPy, Matplotlib. В результате проведённого исследования установлено, что сырые данные с аналитических систем контроля технического состояния зерноуборочных комбайнов не пригодны для анализа и прогнозирования технического состояния узлов и агрегатов. Прежде всего, это связано с большим количеством пропущенных значений. Построение процессной модели на основе разработанного способа предварительной обработки данных может рассматриваться как концепция информационной системы, позволяющей автоматизировать процесс подготовки данных систем контроля технического состояния зерноуборочных комбайнов для машинной обработки. Представленный способ позволил получить структурированные и информативные данные, корректное заполнение пропусков, устранение выбросов и ошибок. Построенная процессная модель обеспечивает прозрачность, контроль и оптимизацию процессов работы с данными, позволит исключить ошибки и противоречия в их дальнейшем анализе, а также создаст условия для повторяемости действий в дальнейшем при обработке аналогичных датасетов, полученных с систем контроля технического состояния зерноуборочных комбайнов.

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн; надёжность; мониторинг; процессная модель

DOI: 10.15393/j2.art.2024.8043

Article

Method and process model for pre-processing data from automated systems for monitoring the technical condition of combine harvesters

Vitaly Pomogaev

Ph. D. in economics, associate professor, Omsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin (Russian Federation), vm.pomogaev@omgau.org

Pavel Revyakin

Ph. D. student, Omsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin (Russian Federation), pi.revyakin@omgau.org

Anna Basakina

Ph. D. student, Omsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin (Russian Federation), as.basakina@omgau.org

Received: 31 July 2024 / Accepted: 15 October 2024 / Published: 2 November 2024

Abstract: Modern self-propelled agricultural machines are characterized by their technological sophistication, complexity and high cost. Ensuring reliability and serviceability of such machines is the key task of technical service. The development of technical service technologies allows collecting, processing and forecasting the technical condition of machines based on the data obtained in the process of machine operation. Data collection is performed by built-in control systems to diagnose and detect malfunctions in the work of machine units and assemblies. The aim of the research was to develop and approbate the method of preliminary data processing obtained with the automatic system of technical condition monitoring and sensors installed on combine harvesters ACROS and to formalize the developed algorithm for further automation of data preparation process for technical analysis. Data quality was assessed according to the following criteria: data volume, data types, number of attributes, presence and number of omissions, presence of duplicates, presence of anomalies, matching categories, normalization and consistency of values, possible homogeneity, and segmentation. The tools used were Python, R, Pandas, NumPy, Matplotlib libraries. The authors established that raw data from analytical systems of technical condition control of combine harvesters were not suitable for analyzing and predicting the technical condition of units and assemblies due to many missing values.

The process model construction based on the developed method of data pre-processing may be considered as a concept of an information system, which allows automating the data preparation process of technical condition control systems of combine harvesters for machine processing. The presented method allowed the authors to obtain structured and informative data and correct filling of omissions and to eliminate outliers and errors. The proposed process model provides transparency, control and optimization of data handling processes, will allow excluding errors and contradictions in their further analysis, and will provide repeatability of actions in the future while processing similar datasets received from the systems of technical condition control of combine harvesters.

Keywords: combine harvester; reliability; monitoring; process model

1. Введение

Проблема обеспечения надёжности сельскохозяйственных машин в последнее время приобретает особую актуальность в связи с возрастанием их сложности и технологичности, последствиями простоя машин в условиях их высокой загруженности, высокой стоимости технического обслуживания и ремонта (ТО и Р). Современные сельскохозяйственные машины в большинстве своём имеют встроенные системы контроля работы узлов и агрегатов. Отдельные ответственные механизмы могут быть дополнительно оснащены системами непрерывного контроля с возможностью накопления и передачи данных [1]. Использование указанных систем контроля позволяет решить важную задачу — обеспечение надёжности машин при минимизации затрат на ТО и Р [2].

В настоящее время встроенные системы контроля на сельскохозяйственных машинах используются как средства диагностирования для оперативного выявления неисправностей в работе узлов и агрегатов машин. Повысить информационную ценность этих данных можно путём их сбора в непрерывном режиме (мониторинг). Собранные системами контроля данные (значения контролируемых параметров) представляют собой многомерные временные ряды. Анализ временных рядов позволяет получить информацию об изменении контролируемых параметров и состоянии машины. Выявление изменений осуществляется различными методами анализа данных и позволяет получить знания о возможных закономерностях в поведении наблюдаемой системы [3].

Однако в научной литературе практически не встречаются исследования качества данных систем контроля сельскохозяйственных машин для целей их последующей обработки. Качество данных существенно влияет на возможность прогнозирования и точность этих прогнозов. В настоящем исследовании поставлена цель разработать и апробировать способ предварительной обработки данных, полученных с помощью автоматической системы контроля технического состояния, датчиков, установленных на зерноуборочных комбайнах ACROS, и формализовать разработанный алгоритм для последующей автоматизации процесса подготовки данных для технического анализа.

2. Материалы и методы

Предварительная обработка данных имеет важнейшее значение для построения качественной аналитики. Необходимость предварительной обработки сырых данных связана с тем, что значения контролируемых параметров могут быть получены в различных единицах, могут быть сбои в работе датчиков, данные могут некорректно выгружаться в хранилище и т. д. Традиционно факторы, влиявшие на качество данных, группируют в три категории: неполнота данных (отсутствуют атрибуты или пропущены значения); зашумлённость данных (ошибочные записи); несогласованность данных (расхождения или конфликт значений).

Предварительная обработка данных — один из самых трудоёмких процессов в техническом анализе, и качество их оценивается по следующим критериям: объём данных, типы данных, количество атрибутов, наличие и количество пропусков, наличие дубликатов, наличие аномалий, соответствие категорий, нормализация и согласованность значений, возможная гомогенность, сегментация.

При неудовлетворительном качестве данных необходимо провести их предварительную обработку:

- Определить исходный объём данных. Источники данных, структуру и другие качественно-количественные характеристики датасета.

- Очистить данные. Выявить наличие дубликатов и произвести их удаление. Определить наличие и выявить природу пропущенных значений с целью определения методов обработки пропусков [4]. Устранить аномалии, зашумления и выбросы. Как правило, применяются такие методы, как удаление, замена пропущенных значений, подстановка среднего значения, подстановка очевидного значения, подстановка регрессионных значений, методы интерполяции, поиск K-соседей [5] и т. д.

- Трансформировать данные. Данные с различных датчиков могут быть получены в разных форматах и единицах измерения, при необходимости выполнить нормализацию и трансформацию данных. Наиболее распространённые методы: метод логарифмического преобразования, дискретизации, кодирования, степенного преобразования [6] и т. д.

- Определить и преобразовать категориальные переменные. Если в датасете присутствуют категориальные данные, необходимо выполнить их преобразование и кодировку. Например, с помощью технологии one-hot encoding.

- Нормализовать данные для уменьшения измерений и шумов, используя методы минимакса, поиска среднего значения стандартного отклонения, сглаживания и т. д.

- Оптимизировать данные для упрощения обработки на основе выявленных закономерностей, примеров из технической документации или известных атрибутов данных. В зависимости от целей обработки, ответственности можно использовать следующие методы: выбор репрезентативного подмножества, установление важных атрибутов, агрегирование данных, сегментация данных [7] и т. д.

- Предварительно визуализировать данные [8]. Для лучшего понимания структуры датасета, распределения данных, идентификации выбросов, корреляции между переменными, сезонными или событийными паттернами можно воспользоваться методами визуализации данных как по определённой выборке, так и по всему датасету в целом. Например, можно построить графики линий тренда, гистограммы, диаграммы рассеяния, линейные графики, тепловые карты.

Предварительная обработка данных и визуализация результатов в настоящем исследовании осуществлялась с помощью следующих программных продуктов:

- В качестве инструментов автоматизации и среды выполнения исходного кода использовались Python и R.

- В качестве инструмента для работы с наборами данных использовались библиотеки: Pandas (<https://pandas.pydata.org/>), NumPy (<https://numpy.org/>).
- В качестве инструмента для визуализации использовалась библиотека и Matplotlib (<https://matplotlib.org/>).

3. Результаты

3.1. Определение качества данных

В рамках данного исследования авторы работали с датасетом, полученным с помощью автоматизированной системы мониторинга технического состояния и датчиков, установленных на зерноуборочных комбайнах серии ACROS.

Датасет охватывает временной интервал с 16.07.2021 г. по 10.10.2021 г. В тестовой выборке представлены данные, полученные с одного зерноуборочного комбайна. Записи экспортированы в CSV формат, общее количество записей — 117 245 шт., суммарный объём датасета равен 85 мегабайт. Выгрузка датасета выполнена в табличном виде и содержит множественные временные ряды. Структура датасета описана в таблице 1.

Таблица 1. Структура исходного датасета

Table 1. Structure of the original dataset

№ п/п	Наименование столбца	Описание типа данных	Метаданные
1	timestamp_create	Object	Дата и время создания записи
2	params	Object	Служебная диагностическая информация для системы с параметрами переданного пакета данных
3	speed	Float64	Скорость зерноуборочного комбайна, км/ч
4	data	Object	Данные о движении, технологическом режиме, загрузке и скорости зерноуборочного комбайна в формате JSON
5	sensors_data	Object	Данные, полученные с датчиков, установленных на зерноуборочном комбайне, в формате JSON

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в текущем датасете собраны данные с различных информационных подсистем зерноуборочного комбайна. В части содержания данные разделены на две категории: представлены в номинальном виде и в строковом формате JSON, в части группировки поделены на пять категорий: временной штамп, служебная информация, данные о скорости, данные о загрузке и режимах работы, данные с датчиков, установленных на зерноуборочном комбайне.

На рисунке 1 отображён фрагмент датасета, выгруженного в табличном виде для удобства визуального представления и понимания структуры информации.

timestamp_create	params	speed	data	sensors_data
25.07.2019 12:02	msgId:3:0	0	["don": fa ("ACTIVE": 1564045377000, "LATITUDE": 46.752916666666664, "LONGITUDE": 38.644708333333334, "BUNKER_CAP": 9.0)	
25.07.2019 12:05	msgId:3:0	0	["don": fa ("ACTIVE": 1564045527000, "LATITUDE": 46.752916666666664, "LONGITUDE": 38.644708333333334, "BUNKER_CAP": 9.0)	
25.07.2019 12:06	msgId:3:0	0	["don": fa ("ACTIVE": 1564045617000, "LATITUDE": 46.752916666666664, "LONGITUDE": 38.644708333333334, "BUNKER_CAP": 9.0)	
25.07.2019 12:09	msgId:3:0	0	["don": fa ("ACTIVE": 1564045767000, "LATITUDE": 46.752916666666664, "LONGITUDE": 38.644708333333334, "BUNKER_CAP": 9.0)	
25.07.2019 12:07	msgId:3:0	0	["don": fa ("ACTIVE": 1564045662000, "LATITUDE": 46.752916666666664, "LONGITUDE": 38.644708333333334, "BUNKER_CAP": 9.0)	
25.07.2019 12:18	msgId:3:0	0	["don": fa ("ON_NK": 0.0, "ACTIVE": 1564046289000, "ON_100": 0.0, "ON_WAY": 0.0, "LATITUDE": 46.752916666666664, "ON_BRAKE": 1.0, "ON_EMPTY": 0.0, "LONGITUDE": 38.644708333333334, "ON_UPLOAD": 0.0)	
23.07.2019 8:12	msgId:3:0	0	["don": fa ("ACTIVE": 1563858750000, "LATITUDE": 46.752883333333334, "LONGITUDE": 38.644588333333333, "BUNKER_CAP": 9.0)	
23.07.2019 8:10	msgId:3:0	0	["don": fa ("ACTIVE": 1563858645000, "LATITUDE": 46.752883333333334, "LONGITUDE": 38.644588333333333, "BUNKER_CAP": 9.0)	
23.07.2019 8:28	msgId:3:0	0	["don": fa ("ACTIVE": 1563859725000, "LATITUDE": 46.752883333333334, "LONGITUDE": 38.644588333333333, "BUNKER_CAP": 9.0)	
23.07.2019 8:31	msgId:3:0	0	["don": fa ("ACTIVE": 1563859890000, "LATITUDE": 46.752883333333334, "LONGITUDE": 38.644588333333333, "BUNKER_CAP": 9.0)	
23.07.2019 8:22	msgId:3:0	0	["don": fa ("ACTIVE": 1563859335000, "LATITUDE": 46.752883333333334, "LONGITUDE": 38.644588333333333, "BUNKER_CAP": 9.0)	
16.07.2019 11:27	msgId:3:0000000000	0	["don": fa ("ACTIVE": 1563265653000, "BUNKER_CAP": 9.0)	
16.07.2019 11:27	msgId:3:0000000000	0	["don": fa ("ACTIVE": 1563265638000, "BUNKER_CAP": 9.0)	
16.07.2019 11:27	msgId:3:0000000000	0	["don": fa ("ACTIVE": 1563265668000, "BUNKER_CAP": 9.0)	
16.07.2019 11:28	msgId:3:0000000000	0	["don": fa ("ACTIVE": 1563265683000, "BUNKER_CAP": 9.0)	
16.07.2019 11:28	msgId:3:0	0	["don": fa ("ACTIVE": 1563265727000, "LATITUDE": 46.75285, "LONGITUDE": 38.644763333333333, "BUNKER_CAP": 9.0)	
16.07.2019 11:28	msgId:3:0000000000	0	["don": fa ("ACTIVE": 1563265698000, "BUNKER_CAP": 9.0)	
16.07.2019 11:28	msgId:3:0000000000	0	["don": fa ("ACTIVE": 1563265713000, "BUNKER_CAP": 9.0)	
16.07.2019 11:29	msgId:3:0	0	["don": fa ("ACTIVE": 1563265742000, "LATITUDE": 46.75285, "LONGITUDE": 38.644763333333333, "BUNKER_CAP": 9.0)	
16.07.2019 11:29	msgId:3:0	0	["don": fa ("ACTIVE": 1563265757000, "LATITUDE": 46.75285, "LONGITUDE": 38.644763333333333, "BUNKER_CAP": 9.0)	
16.07.2019 11:29	msgId:3:0	0	["don": fa ("ACTIVE": 1563265772000, "LATITUDE": 46.75285, "LONGITUDE": 38.644763333333333, "BUNKER_CAP": 9.0)	
16.07.2019 11:29	msgId:3:0	0	["don": fa ("ACTIVE": 1563265787000, "LATITUDE": 46.75285, "LONGITUDE": 38.644763333333333, "BUNKER_CAP": 9.0)	
16.07.2019 11:30	msgId:3:0	0	["don": fa ("ACTIVE": 1563265802000, "LATITUDE": 46.75285, "LONGITUDE": 38.644763333333333, "BUNKER_CAP": 9.0)	
16.07.2019 11:30	msgId:3:0	0	["don": fa ("ACTIVE": 1563265817000, "LATITUDE": 46.75285, "LONGITUDE": 38.644763333333333, "BUNKER_CAP": 9.0)	
16.07.2019 11:30	msgId:3:0	0	["don": fa ("ACTIVE": 1563265832000, "LATITUDE": 46.75285, "LONGITUDE": 38.644763333333333, "BUNKER_CAP": 9.0)	

Рисунок 1. Фрагмент датасета в табличном представлении [рисунок авторов]

Figure 1. Fragment of a dataset in a tabular representation

С помощью функции библиотеки Matplotlib [9] была построена гистограмма (рисунок 2), где столбцы отражают процент пропущенных записей по параметру от общего числа наблюдений по параметру. Для признака speed значение показателя пропусков составило 0,14 %, для остальных признаков пропусков не обнаружено.

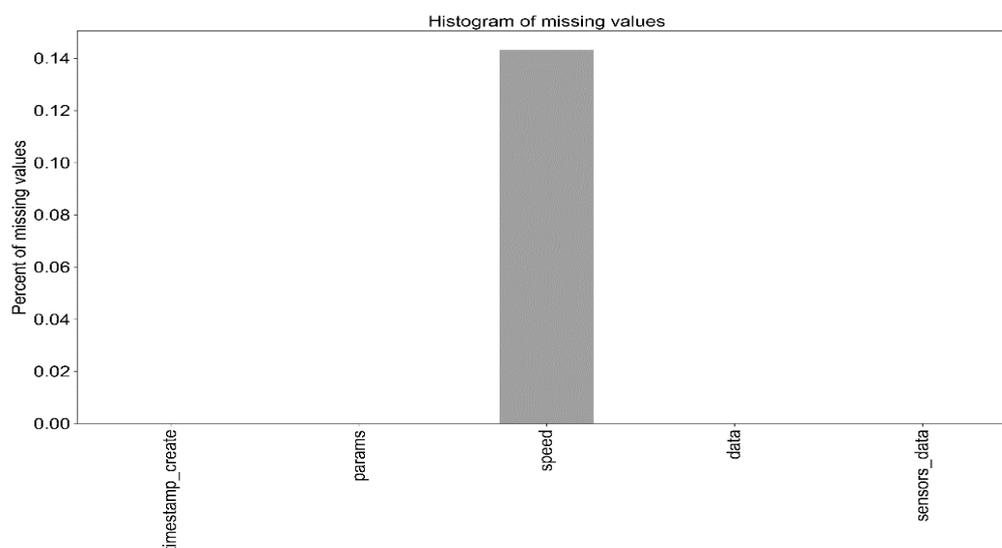


Рисунок 2. Гистограмма пропущенных значений записей в сырых данных [рисунок авторов]

Figure 2. Histogram of missing record values in raw data

Визуальное представление позволяет сделать вывод о том, что общий уровень пропусков в необработанных данных минимален. Важно учесть, что карта отслеживает присутствие или отсутствие записей, не оценивая их количественные характеристики. Для вычисления процентного соотношения пропущенных записей к общему числу записей применялась функция библиотеки Pandas, подсчитывающая пустые значения.

Следующим этапом предварительной обработки данных являлось преобразование строк формата JSON в формат «Признак — Запись». В результате преобразования датасет приведён к структурированному виду (рисунок 3).

timestamp_create	params	speed	data.don	data.mov	data.load	data.mode	data.speed	sensors_data.ACTIVE	sensors_data.LATITUDE	sensors_data.LONGITUDE
16.07.2019 11:27	msgid:3:0000000000000000109215	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	156326563000		
16.07.2019 11:27	msgid:3:0000000000000000109214	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265638000		
16.07.2019 11:27	msgid:3:0000000000000000109216	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265668000		
16.07.2019 11:28	msgid:3:0000000000000000109217,VerSDM:3:2.3.3,VerLinux:3:2.0-4.1.15-1.1.1	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265663000		
16.07.2019 11:28	msgid:3:0000000000000000109220	0	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265727000	46,75285	38,64476333
16.07.2019 11:28	msgid:3:0000000000000000109218	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265668000		
16.07.2019 11:28	msgid:3:0000000000000000109219	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265713000		
16.07.2019 11:29	msgid:3:0000000000000000109221	0	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265742000	46,75285	38,64476333
16.07.2019 11:29	msgid:3:0000000000000000109222	0	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265757000	46,75285	38,64476333
16.07.2019 11:29	msgid:3:0000000000000000109223	0	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265772000	46,75285	38,64476333
16.07.2019 11:29	msgid:3:0000000000000000109224	0	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265787000	46,75285	38,64476333
16.07.2019 11:30	msgid:3:0000000000000000109225	0	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265802000	46,75285	38,64476333
16.07.2019 11:30	msgid:3:0000000000000000109226	0	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265817000	46,75285	38,64476333
16.07.2019 11:30	msgid:3:0000000000000000109227	0	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265832000	46,75285	38,64476333
16.07.2019 11:30	msgid:3:0000000000000000109228	0	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265847000	46,75285	38,64476333
16.07.2019 11:31	msgid:3:0000000000000000109229	0	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265862000	46,75285	38,64476333
16.07.2019 11:31	msgid:3:0000000000000000109230	0	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265877000	46,75285	38,64476333
16.07.2019 11:31	msgid:3:0000000000000000109231	0	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265892000	46,75285	38,64476333
16.07.2019 11:31	msgid:3:0000000000000000109232	0	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265907000	46,75285	38,64476333
16.07.2019 11:32	msgid:3:0000000000000000109233	0	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265922000	46,75285	38,64476333
16.07.2019 11:32	msgid:3:0000000000000000109234	0	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265937000	46,75285	38,64476333
16.07.2019 11:32	msgid:3:0000000000000000109235	0	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265952000	46,75285	38,64476333
16.07.2019 11:32	msgid:3:0000000000000000109236	0	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265967000	46,75285	38,64476333
16.07.2019 11:33	msgid:3:0000000000000000109237	0	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265982000	46,75285	38,64476333
16.07.2019 11:33	msgid:3:0000000000000000109238	0	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563265997000	46,75285	38,64476333
16.07.2019 11:33	msgid:3:0000000000000000109239	0	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563266012000	46,75285	38,64476333
16.07.2019 11:33	msgid:3:0000000000000000109240	0	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563266027000	46,75285	38,64476333
16.07.2019 11:34	msgid:3:0000000000000000109241	0	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	0	M2	0	1563266042000	46,75285	38,64476333

Рисунок 3. Фрагмент структурированного датасета [рисунок авторов]

Figure 3. Fragment of a structured dataset

Данные, которые были представлены в номинальном виде, остались неизменными, а строки, содержащие неструктурированные данные, в формате JSON преобразованы в параметры и записи. Алгоритм преобразования построен следующим образом: в датасет добавлялся новый признак с записью, которой соответствует значение переменной в обрабатываемой строке JSON. Имя признака состоит из префикса — имени столбца, в котором находится обрабатываемая строка JSON, и суффикса — имени переменной в обрабатываемой строке JSON. Префикс и суффикс разделяются символом «точка». Для примера рассмотрим столбец data и переменную в строке JSON don. После операции преобразования в датасете появился новый признак data.don с записями, которым соответствовали значения переменной don в строке JSON. Аналогично выполнены преобразования остальных строковых переменных в последовательном порядке во избежание потери данных.

Для приведения записей к единой численной системе измерения была выполнена операция трансформации данных. Логические записи ЛОЖЬ или ИСТИНА преобразованы методом унитарного кодирования в записи с десятичными значениями: 0 и 1 соответственно.

Анализ записей, представленных в десятичной системе, позволил выявить дополнительные категории данных, по которым в дальнейшем можно осуществить

группировку параметров. Категорирование записей параметров, получаемых с датчиков, установленных на зерноуборочном комбайне, можно произвести по следующим признакам:

- Числовые значения, которые изменяются в течение временного периода нарастающим итогом с положительной или отрицательной динамикой (уровень топлива в баке, уровень загрузки бункера, остаток пробега до следующего ТО и т. п.).
- Числовые значения, которые характеризуют физические величины (скорость, температура, давление, величина зазора, частота оборотов и т. п.).
- Дискретные значения, которые фиксируют состояние «включено» или «выключено» для элементов, агрегатов или функциональных систем.

В результате преобразований записей и приведения их к единому виду целесообразно повторно рассмотреть датасет в целом на предмет наличия пропусков и аномалий.

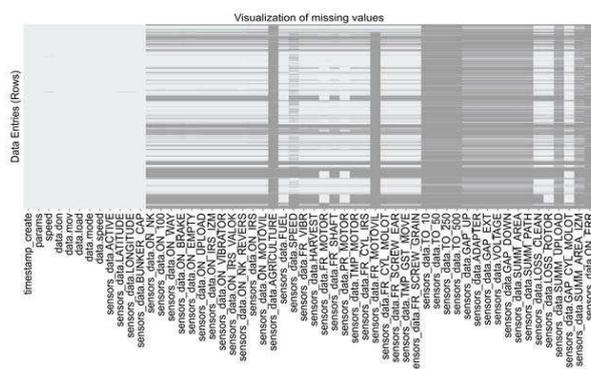


Fig. А – Тепловая карта

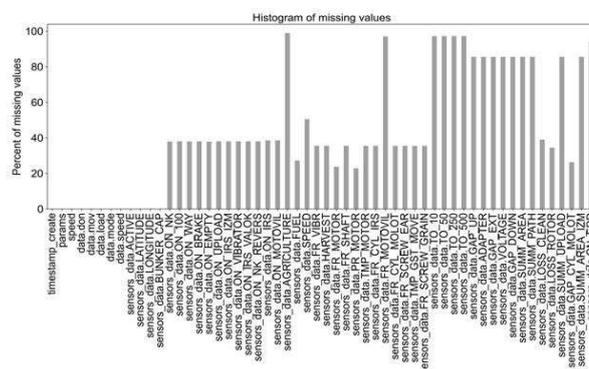


Fig. Б – Гистограмма

Рисунок 4. Тепловая карта и гистограмма пропущенных значений записей в структурированном датасете без обработки пропусков [рисунок авторов]

Figure 4. Heat map and histogram of missing record values in a structured dataset without gap processing

На рисунке 4 показана тепловая карта и гистограмма пропущенных значений записей структурированного датасета. Карта представлена в двумерной форме, где ось X визуализирует признаки параметров, а ось Y — строки данных наблюдений. Точка пересечения осей посредством различной окраски демонстрирует наличие или отсутствие записи. Светлая палитра обозначает наличие, в то время как более тёмные оттенки указывают на пропуск.

Данные гистограммы указаны в порядке представления их в датасете, для сохранения визуального сопоставления с тепловой картой. Визуальный анализ позволяет сделать вывод, о том, что по сравнению с предыдущей итерацией предварительной обработки данных количество пропущенных значений записей более существенно. Это связано с тем, что в процессе разбора текстовых строк в формате JSON было получено большее число индивидуальных параметров.

В текущей итерации предварительной обработки рассчитанный процент пропущенных значений составил 43,78 % от общего числа записей. Общее число пропущенных значений в датасете определено методом поиска и подсчёта пропущенных значений с помощью функции библиотеки Pandas. Далее определён процент пропусков от общего числа записей датасета.

3.2. Обработка пропусков

Для того чтобы правильно обработать пропуски, необходимо понимать механизм их формирования [10]. Рассмотрим датасет, согласно ранее определённой структуре, опираясь на категории данных (см. таблицу 1). Для упрощения идентификации категорий в дальнейшей работе каждой категории данных присвоены индексы (таблица 2). Произведём расчёт процента пропущенных значений внутри каждой категории. Для определения числа пропущенных значений по категориям определено количество пропусков по каждому наблюдаемому параметру, с помощью функций библиотеки Pandas:

- `isnull(Paramn)` — определение числа пропусков по параметру.
- `sum(Catn)` — суммарное значение количества пропусков по параметрам, входящим в каждую категорию: Cat1, Cat2, Cat3.

Таблица 2. Расчёт процента пропущенных значений по категориям

Table 2. Calculation of percentage of missing values by category

Индекс	Префикс и суффикс параметров	Число параметров	Процент пропущенных значений
Cat1	timestamp_create params speed	3	0,1
Cat2	data.*	5	0
Cat3	sensors data.*	48	43,68

Согласно данным (см. таблицу 2), категории Cat1 и Cat2 практически не имеют пропусков. Опираясь на характер данных и метаданные датасета, можно сделать вывод о том, что на протяжении всего периода наблюдения система сбора и передачи данных работала исправно. В категории Cat3 наблюдается наибольший процент пропущенных значений — 43,68 %, обработка пропусков в данной категории представляет научный интерес, т. к. перечень параметров, входящих в эту категорию, характеризует техническое состояние узлов, механизмов и агрегатов зерноуборочного комбайна, а также позволяет судить о качестве выполнения агротехнологических операций.

Первоочередной задачей данного этапа предварительной обработки является выявление наблюдений, в которых отсутствуют записи по всем параметрам категории Cat3, данные

наблюдения могут быть безопасно удалены из датасета, т. к. не несут в себе информативную часть. Их наличие, возможно, связано с отсутствием сигналов или неисправностью подсистемы сбора и передачи данных с датчиков, установленных на зерноуборочном комбайне.

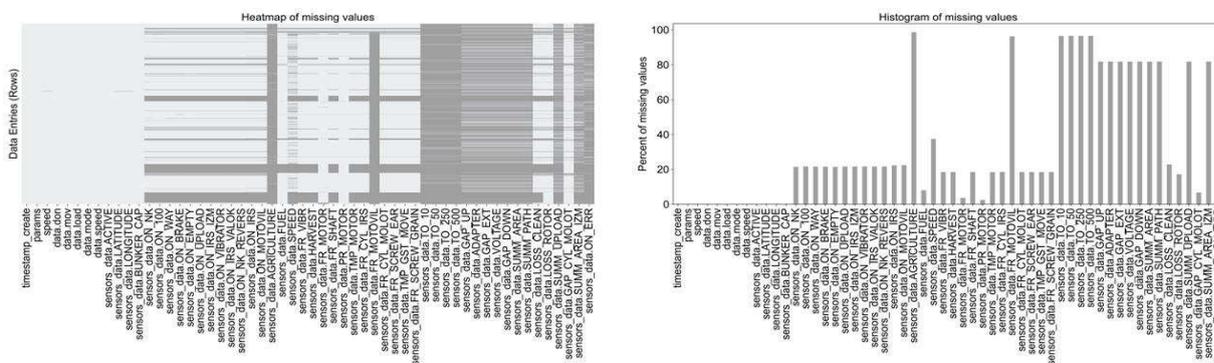


Fig. A – Тепловая карта

Fig. B – Гистограмма

Рисунок 5. Тепловая карта и гистограмма пропущенных значений записей в структурированном датасете после удаления неинформативных наблюдений [рисунок авторов]

Figure 5. Heat map and histogram of missing record values in a structured dataset after removing uninformative observations

Анализируя тепловую карту и гистограмму (рисунок 5), можно сделать вывод о том, что логическая структура датасета после преобразования не изменилась, однако процент пропусков, согласно расчётам, уменьшился и составляет 34,57 % от общего числа записей в датасете. Распределение значений пропусков по периодическим параметрам многомерных временных рядов носит циклический характер. Шаг параметра цикла равен периоду опроса датчиков измеряемых величин. Можно предположить, что данные пропуски формируются по принципам механизма MNAR [21, с. 35], — вероятность появления пропуска зависит в т. ч. от фактора, о котором мы ничего не знаем.

При атрибутировании пропусков MNAR использование методов удаления пропусков неприемлемо, т. к. это приведёт к значительному искажению распределения статистических свойств датасета.

Выбор метода заполнения пропусков зависит от значений записей в рассматриваемой категории. Рассчитав число пропусков по каждому наблюдаемому параметру, процент пропусков от общего числа наблюдений по параметру и период опроса датчика по рассматриваемому параметру (таблица 3), можно определить конкретное значение для заполнения пропуска параметра.

Таблица 3. Расчёт процента пропущенных значений по категориям

Table 3. Calculation of percentage of missing values by category

Параметр	Число пропусков по параметру, шт.	Процент пропусков от общего числа наблюдений по параметру	Период опроса датчика по параметру
timestamp create	0	0,00	—
params	0	0,00	—
speed	161	0,17	15 с
data.don	0	0,00	15 с
data.mov	0	0,00	15 с
data.load	0	0,00	15 с
data.mode	0	0,00	15 с
data.speed	0	0,00	15 с
sensors data.ACTIVE	0	0,00	15 с
sensors data.LATITUDE	150	0,16	15 с
sensors data.LONGITUDE	150	0,16	15 с
sensors data.BUNKER CAP	0	0,00	15 с
sensors data.ON NK	22888	23,92	15 с
sensors data.ON 100	23077	24,11	15 с
sensors data.ON WAY	23013	24,05	15 с
sensors data.ON BRAKE	23027	24,06	15 с
sensors data.ON EMPTY	22900	23,93	15 с
sensors data.ON UPLOAD	23053	24,09	15 с
sensors data.ON IRS IZM	23054	24,09	15 с
sensors data.ON VIBRATOR	23087	24,12	15 с
sensors data.ON IRS VALOK	23054	24,09	15 с
sensors data.ON NK REVERS	23102	24,14	15 с
sensors data.ON IRS	23736	24,80	15 с
sensors data.ON MOTOVIL	23752	24,82	15 с
sensors data.AGRICULTURE	94488	98,73	Не определён
sensors data.FUEL	10403	10,87	15 с
sensors data.SPEED	37720	39,42	15 с
sensors data.FR VIBR	20113	21,02	15 с
sensors data.HARVEST	20125	21,03	15 с
sensors data.FR MOTOR	6333	6,62	15 с
sensors data.FR SHAFT	20134	21,04	15 с
sensors data.PR MOTOR	5283	5,52	15 с
sensors data.TMP MOTOR	20076	20,98	15 с
sensors data.FR CYL IRS	20130	21,03	15 с
sensors data.FR MOTOVIL	92270	96,42	15 с
sensors data.FR CYL MOLOT	20125	21,03	15 с
sensors data.FR SCREW EAR	20100	21,00	15 с
sensors data.TMP GST MOVE	20049	20,95	15 с
sensors data.FR SCREW GRAIN	20110	21,01	15 с
sensors data.TO 10	92505	96,66	30 мин
sensors data.TO 50	92505	96,66	30 мин
sensors data.TO 250	92505	96,66	30 мин

sensors_data.TO 500	92505	96,66	30 мин
sensors_data.GAP UP	78814	82,36	5 мин
sensors_data.ADAPTER	78845	82,39	5 мин
sensors_data.GAP EXT	78815	82,36	5 мин
sensors_data.VOLTAGE	78814	82,36	5 мин
sensors_data.GAP DOWN	78814	82,36	5 мин
sensors_data.SUMM AREA	78826	82,37	5 мин
sensors_data.SUMM PATH	78825	82,37	5 мин
sensors_data.LOSS CLEAN	24173	25,26	15 с
sensors_data.LOSS ROTOR	18931	19,78	15 с
sensors_data.SUMM UPLOAD	78827	82,37	5 мин
sensors_data.GAP CYL MOLOT	9255	9,67	15 с
sensors_data.SUMM AREA IZM	78827	82,37	5 мин
sensors_data.ON ERR	88825	92,82	Не определён

Периоды опроса датчиков измеряемых величин: 15 с (15"), 5 мин (5'), 30 мин (30').
 Описательная статистика процента пропусков от общего числа наблюдений по параметру для каждого значения периода опроса представлена в таблице 4.

Таблица 4. Описательная статистика по процентам пропусков

Table 4. Descriptive Statistics for Missing Rates

Период опроса датчика по параметру	15"	5'	30'
Среднее	17,78	82,37	96,66
Медиана	21,02	82,37	96,66
Мода	0,00	82,36	96,66
Минимум	0,00	82,36	96,66
Максимум	96,42	82,39	96,66
Счёт	39,00	9,00	4,00

Проанализировав сводную таблицу 4 описательной статистики и категории Cat3 параметров, выявили закономерности частоты возникновения пропусков в зависимости от периода опроса датчиков измеряемых величин.

Наибольшее число параметров принадлежит периоду опроса 15 с, обозначим группу этих параметров как Gmissed15" и построим гистограмму распределения величин по процентам пропусков в каждом параметре (рисунок 6).

Процент пропусков по параметрам в группе Gmissed15" имеет большой разброс — от 0 до 96,42 %. Учитывая большой разрыв между максимальным и минимальным значениями процентов пропуска в группе Gmissed15" (см. рисунок 6), оценка тенденции возникновения пропусков данных по среднему значению нецелесообразна. В данном случае в качестве меры оценки тенденции проявления пропусков стоит рассматривать значение медианы — Me15" = 21,02 (см. таблицу 4). В большинстве наблюдений значение процента пропуска близко к значению 21,02 %. Из наблюдаемых параметров группы Gmissed15"

по семи параметрам наблюдается полнота данных (количество пропусков 0), три параметра имеют процент пропуска менее 1 % (0,16 %; 0,17 %), в девяти параметрах процент пропусков составил 20—22% — числовые значения, которые характеризуют физические величины (температура, давление, частота оборотов), 12 параметров (23—25 % пропусков) относятся к дискретным значениям, которые фиксируют состояние «включено» или «выключено» для элементов, агрегатов или функциональных систем.

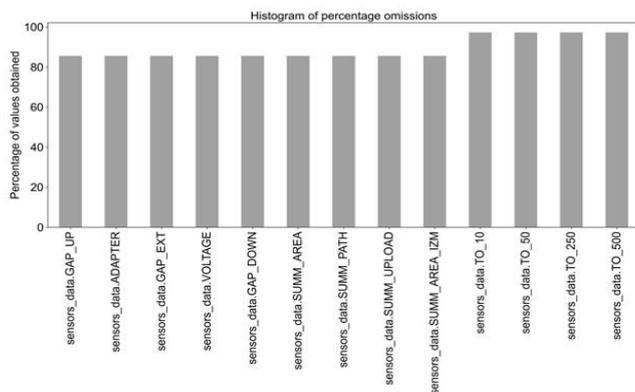


Fig. А – Гистограмма по периодам 5 минут и 30 минут

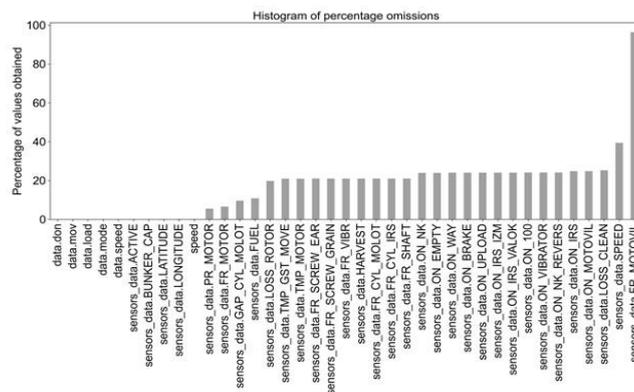


Fig. В – Гистограмма по периоду 15 секунд

Рисунок 6. Гистограммы процентов пропусков по параметрам и периодам опроса [рисунок авторов]

Figure 6. Histograms of percentage of omissions by parameters and polling periods

Определить единый метод заполнения пропусков для всех параметров группы Gmissed15'' невозможно, выбор метода для каждого параметра будет зависеть от контекста, целей конкретного исследования и ряда иных факторов: к какой категории данных принадлежит параметр, физический смысл параметра, размерность параметра, принадлежность к совокупности генеральных диагностических параметров и т. д.

Группу показателей, принадлежащих к периоду опроса датчиков 5 мин, обозначим Gmissed5'. Количество параметров, принадлежащих к данной группе, 9, значения ключевых показателей описательной статистики равны, в качестве значения процента пропусков по каждому параметру в группе Gmissed5' принимаем значение 82,37 % (см. таблицу 4). Наблюдается общая тенденция проявления пропусков данных по параметрам в группе Gmissed5' (см. рисунок 6)

В рассматриваемой группе четыре параметра имеют значения, которые изменяются в течение временного периода нарастающим итогом с положительной динамикой. Метод заполнения пропусков в данном случае — по модели арифметической прогрессии, значение разности прогрессии следует определять по каждому периоду наблюдения. Оставшиеся пропуски параметров группы Gmissed5' заполняются аналогично параметрам группы Gmissed15''.

Группу показателей, принадлежащих периоду опроса датчиков 30 мин, обозначим Gmissед30' (см. рисунок 6). Параметры группы относятся к категории значений, которые изменяются в течение временного периода нарастающим итогом с отрицательной динамикой. Метод заполнения пропусков в данном случае — по модели арифметической прогрессии, значение разности прогрессии следует определять для каждого периода наблюдения.

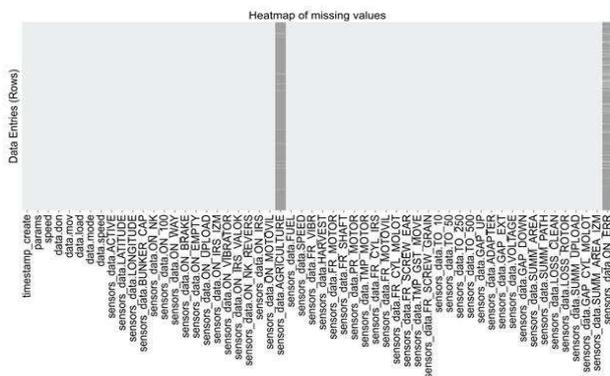


Fig. A – Тепловая карта

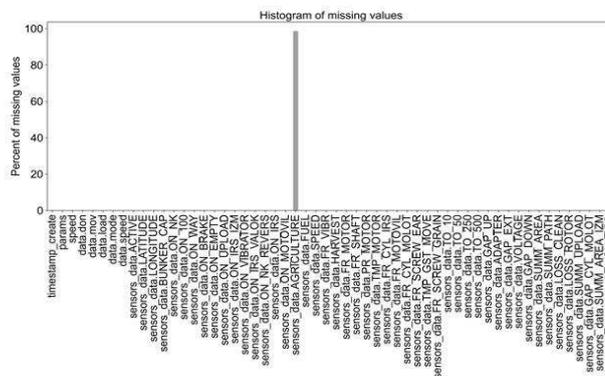


Fig. B – Гистограмма

Рисунок 7. Тепловая карта и гистограмма пропущенных значений записей в структурированном датасете после заполнения пропусков, связанных с периодом опроса [рисунок авторов]

Figure 7. Heat map and histogram of missing record values in a structured dataset after filling in the gaps associated with the survey period

Анализируя тепловую карту и гистограмму (рисунок 7), можно сделать вывод о том, что процент пропусков значительно уменьшился и составляет 3,42 % от общего числа записей в датасете, при этом объём записей в датасете остался неизменным.

В датасете встречаются одиночные пропуски значений, не принадлежащие первым двум видам пропусков, определённых ранее:

- Пропуски, связанные с отсутствием сигналов или неисправностью подсистемы сбора и передачи данных с датчиков, установленных на зерноуборочном комбайне.
- Пропуски, связанные с периодами опросов датчиков.

Данные виды пропусков можно отнести к событийным. Алгоритм их обработки определяется исследователями исходя из контекста, характеристики параметра, связи с другими величинами.

Опираясь на метаданные датасета, определены алгоритмы обработки пропусков:

- Параметр `sensors_data.AGRICULTURE` — заполнение аналогичным значением на период до момента окончания технологической операции.
- Параметр `sensors_data.ON_ERR` — заполнение информативного значения с преобразованием методом унитарного кодирования в десятичную переменную.

Преобразованный датасет не имеет пропусков, информативен, объём записей в нём остался неизменным.

Для отслеживания динамики изменений основных характеристик датасета по итерациям данные сведены в итоговую таблицу 5.

Таблица 5. Количественные характеристики датасета по итерациям предварительной обработки

Table 5. Quantitative characteristics of the dataset by preprocessing iterations

Итерации предварительной подготовки данных	Исходный датасет	Структурированный датасет	Удалены пропуски	Заполнены пропуски	Обработаны одиночные пропуски
Количество записей, шт.	586225	6565720	5191312	5191312	5191312
Количество наблюдений, шт.	117245	117245	92702	92702	92702
Количество пропусков, шт.	168	2874267	1794402	177318	0
Количество пропусков, %	0,03	43,78	34,57	3,42	0

Анализируя итоговую таблицу 5, можно судить о готовности данных к последующим логическим преобразованиям и анализу.

В ходе детальной работы по предварительной обработке данных было проведено всестороннее исследование исходного датасета и реализован ряд преобразований с целью его оптимизации и улучшения качества данных. Полученный датасет представляет собой структурированный, информативный и консистентный материал, пригодный для дальнейших этапов анализа и моделирования [11].

Ключевые аспекты, достигнутые в результате проведённой обработки данных:

- Структурированность. Данные структурированы, обеспечивая лёгкость их восприятия и обработки в последующих этапах работы.
- Информативность. Благодаря проверке и уточнению данных датасет обрёл высокую степень информативности и точности, что повышает вероятность успешного применения в аналитических моделях.
- Отсутствие пропусков. Все пропущенные значения были идентифицированы, обработаны методами одномерной и многомерной обработки, что обеспечивает целостность и надёжность данных.
- Исключение выбросов и ошибок. Были определены и исключены аномальные значения и выбросы, улучшая тем самым общую надёжность и корректность данных.

- Категоризация данных. Для упрощения анализа и повышения интерпретируемости моделей в будущем данные категоризированы, что также способствует улучшению качества последующих аналитических процессов.

3.3. Процессная модель подготовки данных

Для формализации разработанного и апробированного способа подготовки данных и последующей обработки была построена процессная модель. Использование процессного подхода обусловлено тем, что он позволяет обеспечить целостность описания процесса подготовки данных с отражением функционального и информационного слоя [12]. Модель может рассматриваться как концепция информационной системы, позволяющей автоматизировать процесс подготовки данных систем контроля технического состояния зерноуборочных комбайнов для аналитической обработки.

В качестве инструмента формализации процессной модели была выбрана методология функционального моделирования IDEF0. Методология позволяет создавать модели, отображающие структуру и функции системы, а также потоки информации и материальных объектов, связывающих эти функции. Основу методологии IDEF0 составляет графический язык описания (моделирования) систем.

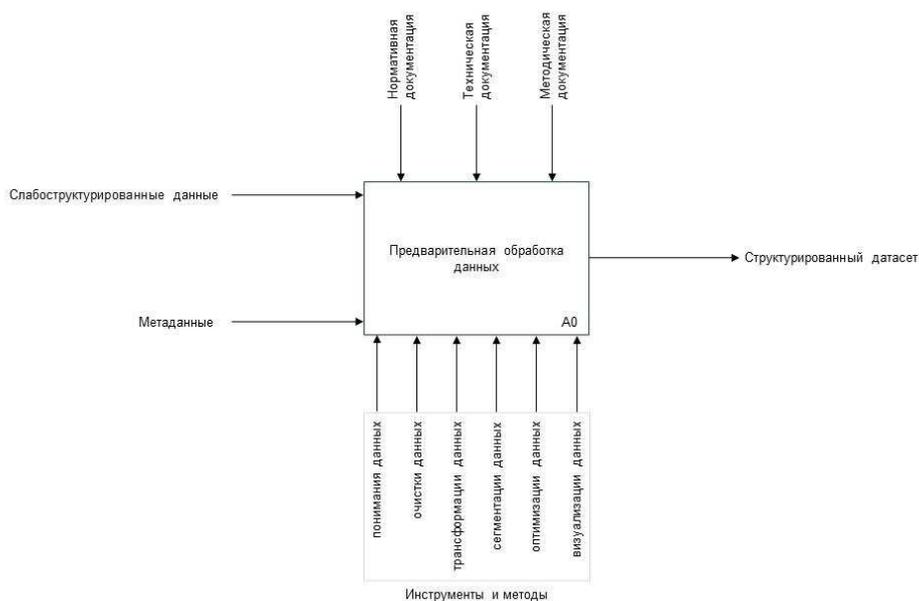


Рисунок 8. Процессная модель предварительной аналитической обработки данных систем контроля технического состояния зерноуборочных комбайнов в нотации IDEF0 [рисунок авторов]

Figure 8. Process model of preliminary analytical processing of data from systems for monitoring the technical condition of combine harvesters in IDEF0 notation

Представленная модель (рисунок 8) состоит из контекстной диаграммы A-0, которая описывает основную цель, с точки зрения исследователя данных, — произвести предварительную обработку данных и подготовить их к дальнейшему машинному анализу. Контекстная диаграмма взаимодействует со следующими компонентами модели:

- Входной сегмент. Модель на входе получает данные, которые в дальнейшем будут преобразованы. В нашем случае на вход модели подаются полуструктурированный датасет и метаданные.
- Сегмент управления. Механизмы модели действуют в соответствии с нормативной, технологической и методологической документацией.
- Механизм. Представляет собой совокупность инструментов, методов и действий по предварительной обработке данных.
- Выходной сегмент. Представляет собой преобразованный моделью объект. В нашем случае это структурированный датасет, полностью подготовленный к дальнейшему машинному анализу.

Для уточнения и алгоритмизации процесса предварительной обработки данных произведена декомпозиция контекстной диаграммы A-0 (рисунок 9).

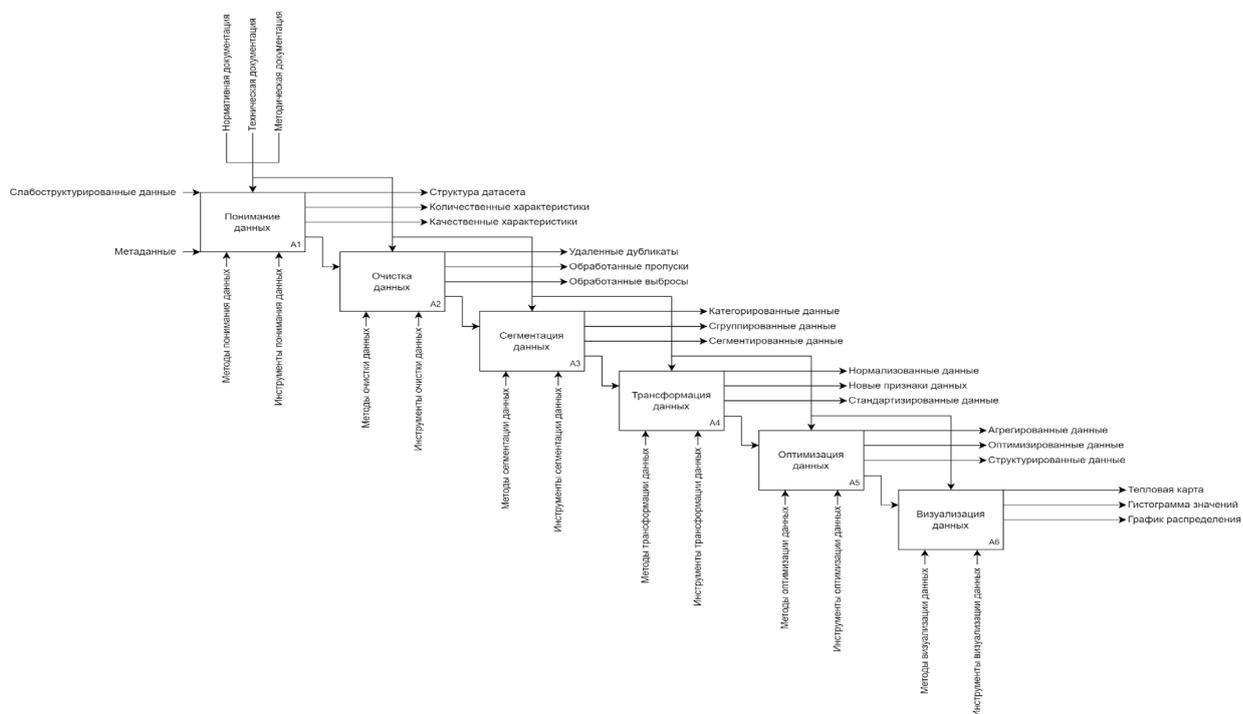


Рисунок 9. Декомпозиция контекстной диаграммы A-0 предварительной обработки данных в нотации IDEF0 [рисунок авторов]

Figure 9. Decomposition of the A-0 context diagram of data preprocessing in IDEF0 notation

Дочерние контекстные диаграммы A1-A6 описывают этапы предварительной обработки датасета. Каждый компонент декомпозированной модели детализирован по основным процессам. Выходная информация текущего этапа является входной для следующего этапа. Стоит отметить, что возможны итерации по этапам в зависимости от полученных результатов и целей этапа предварительной обработки.

Предварительная обработка данных — фундаментальный элемент любого аналитического проекта, успешная реализация этого этапа повышает вероятность достижения точных и надёжных результатов в ходе дальнейших исследований.

4. Обсуждение и заключение

В результате проведённого исследования установлено, что в том виде, в котором данные поступают напрямую с аналитических систем контроля технического состояния зерноуборочного комбайна, они не пригодны для анализа и прогнозирования состояния узлов и агрегатов. Прежде всего, это связано с большим количеством пропущенных значений. Так, для категории Cat3 (данные характеризуют техническое состояние узлов, механизмов и агрегатов зерноуборочного комбайна) в рассматриваемом датасете процент пропущенных значений составляет 43,68 %. С целью сохранения целостности датасета для последующего машинного анализа необходимо подобрать свои инструменты восстановления пропущенных значений для каждой категории данных. Определить единый метод заполнения пропусков для всех параметров невозможно, т. к. они относятся к разным категориям параметров, имеют разный физический смысл, различную размерность параметров и т. д.

Разработанный способ предварительной обработки данных позволил получить структурированность данных; информативность данных; отсутствие пропусков, выбросов и ошибок; категоризацию данных. Достижение таких характеристик позволяет заключить, что результаты исследования достигнуты, а предложенный способ предварительной обработки данных позволяет подготовить датасет для последующей машинной обработки.

Построенная процессная модель предварительной обработки данных обеспечивает прозрачность, контроль и оптимизацию процессов работы с данными, позволит исключить ошибки и противоречия в их дальнейшем анализе, а также обеспечит повторяемость действий в дальнейшем при обработке аналогичных датасетов, полученных с систем контроля технического состояния зерноуборочных комбайнов. Модель может рассматриваться как концепция информационной системы, позволяющей автоматизировать процесс подготовки данных систем контроля технического состояния зерноуборочных комбайнов для машинной обработки.

Список литературы

1. *Помогаев В. М.* Мониторинг технического состояния сельскохозяйственных машин и качества выполнения технологических операций // Вестник Омского ГАУ. 2023. № 2 (50). С. 143—152.
2. *Lüttenberg H., Bartelheimer C., Beverungen D.* Designing Predictive Maintenance for Agricultural Machines // *Research papers*. 2018. P. 153.
3. Возможности использования данных электронных систем сельскохозяйственных машин для построения предсказательных моделей / В. М. Помогаев, Г. В. Редреев, П. И. Ревякин [и др.] // Вестник Омского ГАУ. 2022. № 2 (46). С. 153—166. DOI: 10.48136/2222-0364_2022_2_153.
4. *Фомина Е. Е.* Сравнительный анализ методов восстановления пропусков в социологических исследованиях // Российский экономический вестник. 2021. Т. 4, № 1. С. 34—40.
5. *Гусев Д. И.* Алгоритм поиска ближайших соседей // Программные продукты и системы. 2012. № 3. С. 231—234.
6. *Богачев И. В.* Эвристический подход к оптимизации структуры кадров телеметрических данных для задачи сжатия // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 8 (122). С. 1—6.
7. *Клевцов С. И.* Пороговая оценка состояния технического объекта на основе сегментации и идентификации модели контролируемого параметра // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. № 3 (233). С. 201—211.
8. *Вакуленко А. В., Кудрявцев Н. Г.* Визуализация данных с помощью Python и Java Script // Научный вестник Горно-Алтайского государственного университета: сб. ст. / Отв. ред. М. Г. Сухова. Горно-Алтайск: Горно-Алтайский гос. ун-т, 2023. № 17. С. 23—33.
9. *Ефремова А. Н., Полячкова М. А., Васильева Л. В.* Средства визуализации данных в скриптах на языке Python // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 2. С. 62—67.
10. *Шамрик Д. Л.* Базовые методы восстановления пропусков в массивах данных // Информационные технологии в науке и производстве: Материалы V Всерос. молодёж. научно-техн. конф., Омск, 25—26 апр. 2018 года. Омск: Омский гос. техн. ун-т, 2018. С. 73—83.
11. *Маковейчук Я. Т.* Поиск, анализ и подготовка данных для применения методов машинного обучения // Дистанционные образовательные технологии: сб. тр. VIII Междунар. научно-практич. конф., Ялта, 19—21 сент. 2023 года. Симферополь: ООО «Издательство, Типография «Ариал», 2023. С. 218—222.
12. *Van der Aalst W.* Data Science in Action // In: *Process Mining*. 2016. P. 3—23. DOI: 10.1007/978-3-662-49851-4_1.

References

1. Pomogaev V. M. Monitoring the technical condition of agricultural machines and the quality of technological operations. *Bulletin of Omsk State Agrarian University*, 2023, no. 2 (50), pp. 143—152. (In Russ.)
2. Lüttenberg H., Bartelheimer C., Beverungen D. Designing Predictive Maintenance for Agricultural Machines. *Research papers*, 2018, p. 153.
3. Pomogaev V. M., Redreev G. V., Revyakin P. I., Basakina A. S. Possibilities of using data from electronic systems of agricultural machines to build predictive models. *Bulletin of Omsk State*

- Agrarian University*, 2022, no. 2 (46), pp. 153—166. doi: 10.48136/2222-0364_2022_2_153. (In Russ.)
4. Fomina E. E. Comparative analysis of methods for recovering passes in sociological research. *Russian Economic Bulletin*, 2021, vol. 4, no. 1, pp. 34—40. (In Russ.)
 5. Gusev D. I. Algorithm for searching for nearest neighbors. *Software products and systems*, 2012, no. 3, pp. 231—234. (In Russ.)
 6. Bogachev I. V. Heuristic approach to optimizing the structure of telemetry data frames for the compression task. *International scientific research journal*, 2022, no. 8 (122), pp. 1—6. (In Russ.)
 7. Klevtsov S. I. Threshold assessment of the state of a technical object based on segmentation and identification of the model of the controlled parameter. *Izvestiya SFU. Technical science*, 2023, no. 3 (233), pp. 201—211. (In Russ.)
 8. Vakulenko A. V., Kudryavtsev N. G. Data visualization using Python and Java Script. *Scientific Bulletin of the Gorno-Altai State University: collection of articles. executive editor*, 2023. Gorno-Altai, Gorno-Altai State University, no. 17, pp. 23—33. (In Russ.)
 9. Efremova A. N., Polyachkova M. A., Vasilyeva L. V. Data visualization tools in scripts in Python. *Proceedings of Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences*, 2019, vol. 2, pp. 62—67. (In Russ.)
 10. Shamrik D. L. Basic methods for restoring gaps in data arrays. *Information technologies in science and production: materials of the V All-Russian Youth Scientific and Technical Conference, Omsk, April 25—26, 2018*. Omsk, Omsk State Technical University, 2018, pp. 73—83. (In Russ.)
 11. Makoveychuk Ya. T. Search, analysis and preparation of data for the application of machine learning methods. *Distance educational technologies: collection of proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference, Yalta, September 19—21, 2023*. Simferopol, Limited Liability Company «Publishing House Typography «Arial», 2023, pp. 218—222. (In Russ.)
 12. Van der Aalst W. Data Science in Action. *In: Process Mining*, 2016, pp. 3—23. doi: 10.1007/978-3-662-49851-4_1.

DOI: 10.15393/j2.art.2024.8083

УДК 630*

Статья

Обоснование необходимости исследования воздействия валочно-трелёвочно-процессорных машин на почвогрунты лесосек на склонах

Кривошеев Андрей Александрович

*аспирант, Ухтинский государственный технический университет
(Российская Федерация), igtukrivosheev@mail.ru*

Швецов Александр Сергеевич

начальник учебной лаборатории 2-й кафедры боевого применения авиационного вооружения, Филиал Военного учебно-научного центра военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» в г. Сызрань (Российская Федерация), Kapitan2304@yandex.ru

Бурмистрова Ольга Николаевна

доктор технических наук, профессор, Ухтинский государственный технический университет (Российская Федерация), olga.burm@mail.ru

Григорьев Игорь Владиславович

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

Ревяко Сергей Иванович

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

Охлопкова Марфа Константиновна

кандидат технических наук, доцент, Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова (Российская Федерация), otk1268@mail.ru

Получена: 20 августа 2024 / Принята: 19 ноября 2024 / Опубликовано: 25 ноября 2024

Аннотация: В современных экономических и политических условиях валочно-трелёвочно-процессорные машины австрийской семейной компании Konrad Forsttechnik GmbH становятся для российских лесозаготовительных компаний

одним из немногих доступных вариантов качественных колёсных лесозаготовительных машин, конструктивно приспособленных для рубок лесных насаждений на склонах. В настоящее время в Иркутской области проводятся производственные испытания эксплуатационной эффективности работы таких машин, но, к сожалению, не уделяется внимания экологической эффективности их эксплуатации. В статье обосновывается необходимость теоретического и экспериментального изучения негативного воздействия колёсных валочно-трелёвочно-процессорных машин на почвогрунты лесосек на склонах на основании анализа развития конструкций лесозаготовительных машин, технологических вариантов их использования, анализа современных научных работ в данной области. На основе обзора и анализа научной литературы, а также данных Национальной ассоциации лесопромышленников «Русский лес» и ассоциации производителей машин и оборудования лесного комплекса «Лестех» показано, что валочно-трелёвочно-процессорные машины австрийской семейной компании Konrad Forsttechnik GmbH имеют очень хорошие перспективы широкого применения в различных природно-производственных условиях, где работают лесозаготовительные предприятия России, прежде всего на пересечённой местности.

Ключевые слова: лесосечные работы; леса на склонах; экологическая эффективность; воздействие на почвогрунты; лесозаготовительные машины

DOI: 10.15393/j2.art.2024.8083

Article

Substantiation of the need to study the impact of felling-skidding-processing machines on the soils of cutting areas on the slopes

Andrey Krivosheev

Ph. D. student, Ukhta State Technical University (Russian Federation), ugtukrivosheev@mail.ru

Alexander Shvetsov

Head of the Training Laboratory of the 2nd Department of Combat Use of Aviation Weapons, Branch of the Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin» in Syzran (Russian Federation), Kapitan2304@yandex.ru

Olga Burmistrova

D. Sc. in engineering, professor, Ukhta State Technical University (Russian Federation), olga.burm@mail.ru

Igor Grigorev

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

Sergey Revyako

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

Marfa Okhlopkova

Ph. D. in engineering, associate professor, Northeastern Federal University named after M. K. Ammosov (Russian Federation), omk1268@mail.ru

Received: 20 August 2024 / Accepted: 19 November 2024 / Published: 25 November 2024

Abstract: In modern economic and political conditions the felling-skidding-processing machines of the Austrian family company Konrad Forsttechnik GmbH are becoming one of the few available options for Russian logging companies to use high-quality wheeled logging machines structurally adapted for logging forest plantations on slopes. Currently, production tests of the operational efficiency of such machines are being

conducted in the Irkutsk region, but, unfortunately, no attention is paid to the environmental efficiency of their operation. The article substantiates the need for a theoretical and experimental study of the negative impact of wheeled felling-skidding-processing machines on the soils of logging sites on slopes. The study should be based on an analysis of the development of logging machine designs, technological options for their use, and an analysis of modern scientific research in this field. Based on the review and analysis of scientific literature, data from the National Association of Timber Manufacturers «Russian Forest», and the Association of manufacturers of machinery and equipment of the Lestech forest complex, it is shown that the felling-skidding-processing machines of the Austrian family company Konrad Forsttechnik GmbH have very good prospects for wide distribution in various natural production conditions of logging enterprises in Russia, mainly in rough terrain conditions.

Keywords: logging operations; forests on slopes; environmental efficiency; impact on soils; logging machines

1. Введение

Пятый пакет санкций Евросоюза, а также санкции других недружественных стран привели к тому, что российским лесозаготовительным компаниям стало крайне сложно обновлять парк лесных машин и поддерживать в работоспособном состоянии имеющиеся лесные машины, поскольку в подавляющем большинстве они производятся на территории указанных стран [1—5]. Несмотря на многолетние и многочисленные призывы и программы развития отечественного лесного машиностроения, практически полностью уничтоженного в постсоветские годы, Российская Федерация оказалась не готова к сложившейся ситуации, в отличие от отрасли сельскохозяйственного машиностроения [6—10].

Большая часть крупных и средних лесозаготовительных предприятий России, заготавливающих более половины всего объёма древесины, и даже многие мелкие лесозаготовительные предприятия не готовы возвращаться к системе машин, предусматривающей механизированную валку, обрезку сучьев и раскряжёвку [11—13]. Отечественные предприятия лесного машиностроения, а также аналогичные предприятия дружественных стран не способны в должной мере на современном этапе заместить освободившуюся нишу отечественного рынка лесных машин [14—16]. При этом все хорошо понимают, что так называемый «параллельный импорт» не может быть оптимальным выходом из ситуации. Отечественные лесозаготовительные компании за почти четверть XXI в. привыкли работать на высокопроизводительных колёсных многооперационных машинах по сортиментной технологии и, как сказано выше, не готовы отказываться от этой практики.

Белорусская компания «Амкодор» и её российская дочерняя компания «Амкодор-Онего» не предлагают в настоящее время колёсные лесные машины, достаточно конкурентные по качеству ушедшим Ponsse, John Deere, Rottne, Komatsu Forest и т. д.

Заявляемые в последнее время к производству колёсные лесные машины ПАО «Камаз» также маловероятно достигнут в обозримом будущем уровня качества продукции ушедших иностранных компаний. А с учётом отсутствия опыта в производстве таких машин, скорее всего, ПАО «Камаз» для начала придётся догонять по уровню качества выпускаемых машин компанию «Амкодор» [14—16]. И пока речь идёт только о машинах, предназначенных для проведения рубок лесных насаждений в равнинных условиях.

Если учесть тот факт, что значительная часть запасов спелой и перестойной древесины (особенно в Сибири и на Дальнем Востоке) находится в районах с пересечённой местностью, для эффективной работы в которой нужны специальные машины [17—21], то становится очевидной необходимость активного поиска доступных в настоящее время для российских лесозаготовительных компаний систем машин, способных конкурировать с ушедшими из-за санкционной войны иностранными производителями и показывать хорошую эксплуатационную и экологическую эффективность не только на равнинной, но и на пересечённой местности.

Учёными и специалистами Петрозаводского государственного университета во главе с доктором технических наук, профессором И. Р. Шегельманом были разработаны концепты универсальной лесозаготовительной машины — валочно-трелёвочно-процессорной (ВТПМ), на колёсном и гусеничном тракторном шасси Онежского тракторного завода [22—27], и обоснованы оптимальные режимы их работы в различных природно-производственных условиях. К сожалению, в реальности они так и не были воплощены.

Но в настоящее время в Российскую Федерацию, несмотря на санкции, успешно поставляются колёсные ВТПМ австрийской семейной компании Konrad Forsttechnik GmbH. С 2023 г. они проходят производственные испытания в Сибирском федеральном округе. Эти испытания проводятся дилером данной компании ООО «КОНРАД РУССЛАНД», офис которой находится в Иркутске. Результаты производственных испытаний этих машин показывают высокую степень эксплуатационной эффективности и безопасности работы как в равнинных условиях, так и на пересечённой местности [28—32].

В то же время многочисленные труды зарубежных и отечественных учёных, а также практика отечественных лесозаготовительных предприятий, осваивающих участки лесного фонда по договорам аренды, показывают, что помимо эксплуатационной эффективности лесных машин очень важной характеристикой является их экологическая эффективность. При проведении упомянутых производственных испытаний, к сожалению, внимание такому аспекту практически не уделяется. Этот момент ложится в основу актуальности темы настоящей работы. Отметим, что исследованию показателей экологической эффективности лесных машин и технологий их применения в различных природно-производственных условиях, прежде всего с точки зрения негативного воздействия лесных машин и трелёвочных систем на их базе на почвогрунты лесосек, посвящены труды многих учёных лесотехнических, политехнических и сельскохозяйственных вузов. В настоящее время ведущие позиции в исследуемом вопросе занимает научная школа «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Вместе с тем значительных комплексных исследований в области экологической эффективности эксплуатации колёсных лесных машин на склонах, особенно учитывающих особенности компоновки и работы ВТПМ, при анализе отечественной и зарубежной научной литературы обнаружить не удалось. В существенной проработке, прежде всего, нуждается ряд вопросов, а именно: ВТПМ компании Konrad Forsttechnik GmbH могут иметь колёсную формулу 4 к 4, 6 к 6 и 8 к 8. Машины с колёсной формулой 6 к 6 представляются наиболее оптимальным вариантом, поэтому можно предположить, что именно они будут более предпочтительны для отечественных лесозаготовительных компаний. При этом физическая картина воздействия отдельного моста машины 6 к 6 будет отличаться от воздействия моста тандемного, тем более, если тандемный мост будет оснащён колёсными моногусеницами. Более того, можно утверждать, что воздействие колёсного движителя на почвогрунты лесосек на склонах ещё является не до конца изученным, что хорошо видно по самым современным

публикациям. Помимо этого, ВТПМ в процессе трелёвки представляет собой трелёвочную систему, у которой деревья или хлысты закреплены в полупогруженном положении, что требует учёта воздействия на почвогрунты и волочащейся части трелюемой пачки. Всё это обуславливает необходимость теоретического и экспериментального изучения несколько отличной картины воздействия колёсных ВТПМ на лесные почвогрунты на склонах.

В свете сказанного выше тематика настоящей работы, направленная на обоснование необходимости исследования показателей процесса взаимодействия современных колёсных ВТПМ и трелёвочных систем на их базе с лесными почвогрунтами на склонах, представляется актуальной как для теории, так и практики лесозаготовительного производства.

2. Материалы и методы

Российская Федерация, как правопреемница СССР, имеет очень богатый, к сожалению практически полностью утраченный, опыт разработки и производства лесных машин [32—35]. Именно в СССР сразу после Великой Отечественной войны под руководством доктора технических наук, профессора, лауреата Сталинской премии С. Ф. Орлова был разработан и поставлен на производство первый в мире специальный трелёвочный трактор КТ-12 (фото 1), который с полным правом можно считать первой специальной лесной машиной. Он был призван решить проблему наиболее энергоёмкой и малопроизводительной операции лесосечных работ — трелёвки [36], [37].

В качестве базы для этой машины был взят трофейный немецкий трактор-кабелеукладчик, у которого были высоко подняты передние и задние катки гусеничного движителя, чтобы он мог успешно преодолевать типичные лесные препятствия — пни, камни, стволы поваленных деревьев и т. д. С того времени это удачное техническое решение отечественных конструкторов позволяет визуально отличить гусеничный движитель специальных лесных машин от гусеничных движителей сельскохозяйственных или промышленных тракторов. Данный трактор был оборудован газогенераторным двигателем, работавшим на древесных чурках. В послевоенный период, когда остро не хватало бензина и солярки, а значительная часть ресурсов уходила на восстановление разрушенной войной страны, это было очень эффективным инженерным решением [38].

По современной классификации трелёвочных тракторов КТ-12 относится к гусеничным, чокерным, выполняющим трелёвку деревьев или хлыстов в полупогруженном положении [39], [40]. Надо отметить, что техническое решение скользяще-чокерного технологического оборудования трелёвочного трактора с принципиальными изменениями успешно дошло до наших дней и по-прежнему остаётся самым дешёвым и лёгким вариантом технологического оснащения трелёвочной техники [41].

В дальнейшем, также под руководством С. Ф. Орлова, выполнялся большой объём НИОКР по совершенствованию конструкции трелёвочных тракторов, разработке и постановке на производство концептуально новых моделей [37].



Фото 1. Первый в мире специальный трелёвочный трактор КТ-12 [37]

Photo 1. The world's first special skidding tractor КТ-12 [37]

Как известно, с чокерными тракторами работают два человека — тракторист (машинист) и чокеровщик. Труд чокеровщика физически тяжёл, травмоопасен и в своё время относился к низкоквалифицированному, т. е. плохо оплачиваемому. В рамках общей политики механизации и машинизации производства в СССР под руководством С. Ф. Орлова были разработаны и поставлены на производство первый в мире бесчокерный трелёвочный трактор — ТБ-1 и его последующие модификации — ТБ-1М и др. [37], [39]. Для своего времени бесчокерные трелёвочные тракторы были настоящим техническим прорывом. Но, к сожалению, во время их постановки на производство не учли возможности выпуска в СССР необходимых для этих тракторов гидроманипуляторов.

Первые трелёвочные тракторы имели двухместные кабины, чтобы в них могли сидеть и тракторист, и чокеровщик, например, при переезде на следующую пашку. Но начиная с тракторов ТДТ-55А, трелёвочная техника Онежского тракторного завода (ОТЗ) получила одноместные кабины (фото 2), поскольку считалось, что в дальнейшем все тракторы будут бесчокерными. Но мощностей, необходимых для производства достаточного количества гидроманипуляторов, не хватило [37].

Аналогичные по составу технологического оборудования тракторам ОТЗ производил Алтайский тракторный завод (АТЗ), чокерные тракторы он выпускал под маркой ТТ-4, бесчокерные — под маркой ЛП-18Г. АТЗ располагался в городе Рубцовске (Алтайский край), и, исходя из географии его расположения, производимые им тракторы имели большую мощность двигателя и предназначались для разработки лесов с объёмом хлыста более $0,4 \text{ м}^3$, которые преобладают в Сибири и на Дальнем Востоке. Кроме более мощного двигателя,

некоторых отличительных моментов в трансмиссии (например, планетарный механизм поворота у тракторов АТЗ в отличие от фрикционного у тракторов ОТЗ), принципиально по использованию в технологическом процессе лесосечных работ чокерные и бесчокерные тракторы ОТЗ и АТЗ друг от друга не отличались [42].



Фото 2. Бесчокерный трелёвочный трактор [36]

Photo 2. A chockerless skidding tractor [36]

Параллельно с производством и совершенствованием наиболее насущно необходимых в те годы трелёвочных машин были начаты разработки первых лесозаготовительных машин, предназначенных для валки деревьев. Это направление НИОКР было обусловлено тяжестью и высоким травматизмом вальщиков леса, несмотря даже появившиеся тогда в лесу и весьма передовые для своего времени специализированные бензиномоторные пилы «Дружба» [43].

Первой серийной лесозаготовительной машиной СССР стала гусеничная, фронтальная, узкозахватная валочная машина ВМ-4 (рисунок 1), созданная на базе трактора ТТ-4. Будучи фланговой узкозахватной, ВМ-4, обычно, разрабатывала лесосеку сплошной рубкой узкими лентами по кругу. Остановившись у очередного дерева, оператор опускал на землю консольное цепное срезающее устройство (для максимально возможного снижения высоты оставляемого пня), опускал на землю перекидной рычаг, подпирали дерево сталкивающим рычагом (чтобы во время пиления пыльную гарнитуру не зажал в пропиле под весом дерева). После выполнения пропилы сталкивающий рычаг валил дерево на рычаг перекидной, который затем перебрасывал комлевую часть через машину (направо) для обеспечения возможности машине зайти на следующую ленту. Если трелёвочной техники хватало, чтобы оперативно убирать поваленные деревья, то перекидной рычаг мог в действие и не вводиться, что сокращало время цикла и повышало производительность [44].

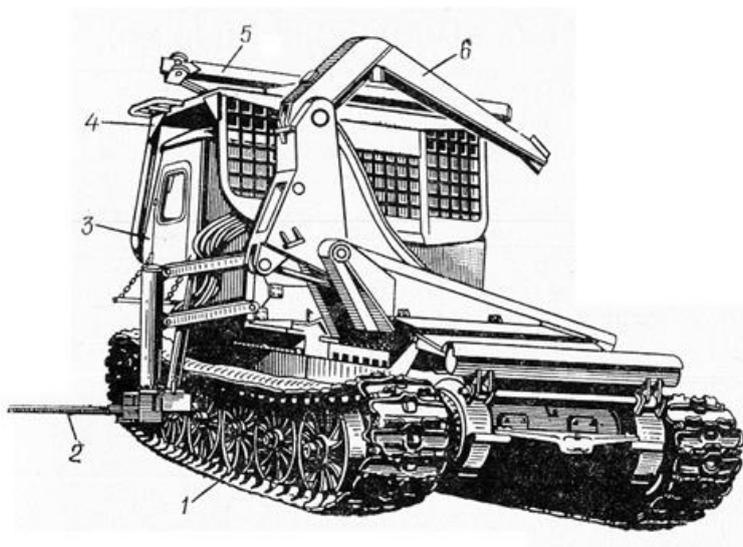


Рисунок 1. Гусеничная, фронтальная, узкозахватная валочная машина VM-4: 1 — гусеничный движитель; 2 — консольное цепное срезающее устройство; 3 — кабина; 4 — защита кабины; 5 — сталкивающий рычаг; 6 — перекидной рычаг [44]

Figure 1. Tracked, frontal, narrow-cut felling machine VM-4: 1 — tracked mover; 2 — cantilever chain shearing device; 3 — cabin; 4 — cabin protection; 5 — colliding lever; 6 — swing lever [44]

Для своего времени VM-4 была достаточно передовой, конечно, она не могла сохранять подрост, не могла работать на выборочных рубках [45]. Но в те времена это не считалось большой проблемой — доминировали сплошные, в большей части концентрированные рубки. Главной проблемой VM-4 было то, что используемый в её конструкции способ валки (без захвата дерева и без направляющего подпила) в большей части случаев приводил к существенным отщепам (сколам) в комлевой (наиболее товарно ценной) части деревьев. Был выполнен значительный объём НИОКР для решения данной проблемы, но до конца она так решена и не была [44], [46].

Пока проводилась доработка валочного узла VM-4, на её базе была создана первая валочно-трелёвочная машина (ВТМ) — VM-4А (рисунок 2). Логика её разработки была очевидна: если машина может выполнять валку деревьев, то пусть она вместо перекидывания комлевой части грузит их на себя (в полупогруженном положении, как чокерные и бесчокерные тракторы), а собрав полную пачку, трелюет на верхний склад. Тогда отпадает необходимость в отдельных трелёвочных тракторах, уменьшается потребность в персонале [44]. Как видно из рисунка 2, машина VM-4А представляла собой машину VM-4 с добавленным в её конструкцию (за кабину) кониковым зажимом. В таком

варианте перекидной рычаг уже не перебрасывал комлевую часть дерева через машину, а укладывал её в заранее раскрытый коник. Её базой также служил трактор ТТ-4 [44].



Рисунок 2. Гусеничная, фронтальная, узкозахватная ВТМ VM-4А [44]

Figure 2. Tracked, frontal, narrow-cut VTM VM-4A [44]

В принципе можно говорить о том, что в виде VM-4A в СССР создали первую универсальную лесозаготовительную машину, если считать, что в дальнейшем вывозка заготовленной древесины производилась в деревьях, а погрузку на лесовозный транспорт выполняли методом самопогрузки.

Но в связи с тем, что срезающее устройство и принцип сталкивания дерева с пня у VM-4A относительно VM-4 практически не изменился, проблемы с частым возникновением сколов в комлевой части заготавливаемых деревьев остались, как осталась и экологическая проблема их использования — невозможность сохранения подроста [46], [47]. И постепенно эти машины были сняты с производства и эксплуатации. Правда, уже в XXI в. Абаканский машиностроительный завод заявлял производство ВТМ VM-4Б, визуально похожей на машину VM-4A, но, как показал анализ данных различных лесозаготовительных предприятий, включая интервьюирование их представителей, а также анкетных данных, полученных благодаря любезной помощи Национальной ассоциации лесопромышленников «Русский лес», в лесу ВТМ VM-4Б так и не появились. Это позволяет утверждать, что эпоха узкозахватных фланговых VM и ВТМ окончательно ушла в прошлое. Но сама концепция ВТМ оказалась достаточно интересной: она позволяла минимизировать количество машин и персонала при практически полной механизации самых тяжёлых и травмоопасных операций лесосечных работ — валки и трелёвки деревьев.

Следующим поколением ВТМ стали гусеничные, фланговые, широкозахватные машины — ЛП-17 (на базе ТБ-1), ЛП-49 (на базе ЛП-18Г) (фото 3) и ряд других, которые имели одинаковый состав технологического оборудования [44]. Они создавались на базе бесчokerных трелёвочных тракторов, только на свободном конце гидроманипулятора у них устанавливался не грейферный захват, а захватно-срезающее устройство (ЗСУ). Благодаря этому они могли валить деревья (слева от себя по ходу движения) и укладывать их в кониковый зажим. После набора полной пачки деревьев они трелевали её на верхний склад или могли сбросить, например, на пасеке или у магистрального трелёвочного волока и продолжить набор следующей пачки, т. е. могли работать в режиме валка — пакетирование. Благодаря наличию ЗСУ, которое удерживало дерево во время пиления, проблема возникновения сколов в комлевой части заготавливаемых деревьев была решена.



Фото 3. ВТМ ЛП-49 [44]

Photo 3. VTM LP-49 [44]

Широкозахватные ВТМ уже могли сохранять подрост, хотя и не могли производить выборочные рубки. Их основной проблемой была их собственная большая масса вместе с массой технологического оборудования, которая существенно снижала полезную грузоподъёмность, а следовательно, повышала коэффициент тары машины, тем самым снижая производительность и повышая удельный расход топлива (л/м³/км) [48], [49]. Вдобавок к этому гидроманипулятор и ЗСУ, особенно элементы их гидропривода, плохо переносили частую транспортировку по лесосеке с пачкой [50], поэтому, как показали

результаты обследования предприятий-пользователей этих машин, они всё чаще использовались в режиме валка — пакетирование.

В те годы хорошо известное НПО «Силава» уже создало первую в мире валочно-пакетирующую машину (ВПМ) ЛП-2 «Дятел» (фото 4), базой для которой послужил трактор ТДТ-55А [51].



Фото 4. ВПМ ЛП-2 «Дятел» [51]

Photo 4. VPM LP-2 Woodpecker [51]

Как видно из сравнения машин на фото 3 и 4, одним из их принципиальных отличий является устройство ЗСУ. Если широкозахватные ВТМ производили валку дерева, то ВПМ производит снятие дерева с пня и вынос его в вертикальном положении из полупасеки, что позволяет ещё лучше сохранять подрост и в принципе делает возможным использование ВПМ на выборочных рубках [52], [53].

В связи с тем, что ВПМ осуществляет снятие дерева с пня и вынос его в вертикальном положении из полупасеки, требуется значительно большее по размерам и массе ЗСУ, с разнесёнными верхними и нижними захватами, чтобы надёжно удерживать дерево во время валки и переноса к месту укладки пакета. Эта конструктивная особенность также хорошо видна при сравнении машин на фото 3 и 4. При снятии дерева с пня и его переносе к месту укладки пакета возникает большой опрокидывающий момент (сила веса дерева и ЗСУ, умноженные на вылет гидроманипулятора). Чтобы этот момент не привёл к опрокидыванию машины, в конструкцию ВПМ ЛП-2 были введены аутригеры (выносные опоры, хорошо видные на фото 4), которые приходилось опускать перед началом работы на каждой технологической стоянке, а затем поднимать перед началом переезда на следующую стоянку. ВПМ ЛП-2 уже является не фланговой широкозахватной машиной, а широкозахватной

машиной кругового действия (полноповоротной), что существенно увеличивает объём заготовленной древесины с одной технологической стоянки, по сравнению с фланговой широкозахватной ВТМ при прочих равных условиях.

Но у ВПМ ЛП-2 и у её последующего варианта МВП-35 был довольно существенный конструктивный недостаток, который хорошо виден на фото 4: машина имеет две кабины — для управления перемещением трактора и для управления технологическим оборудованием. При этом с машиной работает один оператор. Он был вынужден после перемещения машины на очередную технологическую стоянку, которым он управлял из передней кабины, переходить в заднюю кабину — для управления процессом валки деревьев и укладки их в кониковый зажим, после чего перемещался в переднюю кабину, и т. д. Это увеличивало время цикла и снижало производительность. Несмотря на наличие у ВПМ ЛП-2 накопительного коникового зажима, конструкторы изначально не предполагали использование этой машины в качестве ВТМ. После ВПМ должны были использоваться как трелёвочные тракторы с пачковым захватом (пачкоподборщики), которые в настоящее время на производстве и в специальной литературе обычно называют скиддерами [39], [40], [54], [55].

К моменту начала производства и эксплуатации ВПМ ЛП-2 на одной из международных выставок лесной техники американская компания «Дрот» представила новый концепт широкозахватной ВПМ, созданной на экскаваторной базе. Эта машина послужила прототипом хорошо известных специалистам лесной отрасли современных широкозахватных ВПМ кругового действия, в т. ч. и отечественной ВПМ ЛП-19 (фото 5), которая много лет производилась Йошкар-Олинским машиностроительным заводом, а после его развала — Йошкар-Олинской компанией «Лестехком» [51].

После развала СССР, а с ним и плановой экономики машины конструкции, подобной ЛП-19, пытались производить и другие машиностроительные заводы; например, Ковровский машиностроительный завод (изначально производивший экскаваторы) начал выпуск машин МЛ-119. Но они оказались достаточно неудачными по проходимости [56]. Дело в том, что для производства ВПМ ЛП-19 использовалась ходовая часть от трактора ТТ-4 (с высоко поднятыми передними и задними катками гусеничного движителя), а у машин МЛ-119 использовалась ходовая часть от обычного гусеничного экскаватора, не предназначенная для езды по лесу [51], [56]. Для решения проблемы, создаваемой опрокидывающим моментом от веса и дерева, и ЗСУ, у современных ВПМ на экскаваторной базе устанавливаются не аутригеры, а противовесы, которыми служат двигатель, а также комплект запасных частей, инструментов и принадлежностей (комплект ЗИП). Это существенно увеличивает массу машины, а следовательно, увеличивает давление на опорную поверхность, делает практически невозможным использование машин такого типа на почвогрунтах III и IV категории в тёплое время года [51]. Кроме того, для их перемещения между лесосеками необходимы тягчи и тралы большой грузоподъёмности.

Большее внимание приходится уделять прочности мостов и мостиков на территории арендной базы предприятия, через которые планируется перемещать ВПМ.



Фото 5. ВПМ ЛП-19 [51]

Photo 5. VPM LP-19 [51]

Конечно, для различных по крупности древостоев (с различным объёмом хлыста) требуются разные по габаритам, а значит, и массе ЗСУ. При выборе лесозаготовительной машины обычно используют следующий алгоритм: определяются со средним диаметром заготавливаемых деревьев (по таксационным характеристикам предстоящих к разработке лесных участков), умножают его на два, и под удвоенный средний диаметр деревьев подбирают ЗСУ [54], [57]. Определившись с ЗСУ, выбирают машину-носитель — по требуемой массе и мощности привода. Если ВПМ предстоит работать на мелком лесе, а также у узкозахватных фронтальных ВПМ (фото 6) используют ЗСУ с накопителем, который позволяет срезать подряд несколько деревьев, перед тем как перейти к их укладке в пакет. Это существенно повышает производительность [57], [58—61].

Для эффективной работы с ВПМ, а также с ВТМ при их работе в режиме ВПМ в СССР были разработаны и серийно производились колёсные (фото 7) и гусеничные скиддеры, например, ЛТ-230, МЛ-137, ЛТ-154, ЛТ-187, ЛТ-171А, МЛ-56, МЛ-30 и ряд других [39], [44], [62]. Поскольку после ВПМ не требуется собирать пачку поштучно, а на эту фазу рабочего цикла у любой трелёвочной техники уходит больше всего времени, скиддеры, особенно колёсные, имеют самую большую производительность при прочих равных условиях. В отличие от чокерных и бесчокерных тракторов они производят трелёвку не в полупогруженном, а в полуподвешенном положении [39], [44], [62]. Скиддеры трелюют

пачки деревьев за комли, а на комлевою часть пачки приходится около 70 % её веса. При трелёвке в полуподвешенном положении также возникает большой опрокидывающий момент, создаваемый весом вывешенной за корму машины комлевой частью пачки и пачковым захватом [39], [44], [62]. У колёсных полноприводных тракторов с механической трансмиссией это приводит к возникновению в ней циркулирующей (паразитной) мощности, которая негативно сказывается на долговечности её узлов и деталей.



Фото 6. Узкозахватная фронтальная ВПМ с ЗСУ с накопителем [57]

Photo 6. Narrow-cut frontal VPM with a storage device [57]

Серийно выпускаемые в настоящее время в мире ВПМ на экскаваторной базе имеют массу от 25 до 49 т. Они были и остаются самыми высокопроизводительными и самыми тяжёлыми лесозаготовительными машинами. Система машин, включающая ВПМ и скиддер, была и остаётся самой высокопроизводительной при прочих равных условиях [54], [58], [63—66].

К моменту развала СССР в нём доминировала хлыстовая технология лесозаготовок, предусматривавшая вывоз заготовленной древесины в хлыстах (редко в деревьях с кроной) и последующую раскряжёвку на стационарных раскряжёвочных установках (обычно с поштучной подачей и продольным перемещением хлыста, типа ЛО-15), поэтому серийно производились многооперационные лесозаготовительные машины для хлыстовой заготовки — ВТМ и ВПМ [67], [68].

Поскольку первая товарная продукция лесозаготовительного производства (сортименты) получается при выполнении операции раскряжёвки, то от оптимальности раскряя сильно зависят показатели прибыли [69]. Добиться оптимального раскряя можно только на стационарных раскряжёвочных установках, поскольку они создают наилучшие условия

для оценки размерно-качественных характеристик каждого хлыста (порода, размеры, пороки), а это позволяет выбрать оптимальную программу раскроя [70]. Нелишним будет отметить, что хлыстовая технология лесозаготовок была разработана в 40-х гг. XX в. в СССР и её разработчики были награждены Сталинской премией. Хлыстовая технология также успешно использовалась и применяется в ряде зарубежных стран с развитым лесопромышленным комплексом, например, в США и Канаде [68].



Фото 7. Колёсный скиддер [39]

Photo 7. Wheel skidder [39]

В европейских странах применялись и используются, практически на 100 %, сортиментные технологии заготовки древесины, которые предусматривают вывоз из леса сортиментов [71], [72]. При полностью механизированном варианте лесосечных работ распространённые сортиментные технологии принципиально подразделяют на скандинавскую (предусматривающую производство сортиментов на пасеке при помощи валочно-сучкорезно-раскряжёвочной машины — харвестера) и канадскую (это производство сортиментов на верхнем складе при помощи самоходной или прицепной сучкорезно-раскряжёвочной машины — процессора) [54], [69], [73].

Отметим, что харвестер является лесозаготовительной машиной, поскольку конструктивно предназначен для валки деревьев, а процессор является лесной машиной, поскольку конструктивно для валки деревьев не предназначен [74], [75].

В связи с тем, что в СССР доминировала хлыстовая технология лесозаготовок, харвестеры в нём серийно не производились, если не считать единичных машин проекта СОФИТ (советско-финский трактор), который недолго действовал на закате СССР и предусматривал

установку финского технологического оборудования (гидроманипулятора и харвестерной головки) на советский колёсный сельскохозяйственный трактор [44].

В паре с харвестером работает форвардер (сортиментоподборщик), который выполняет сбор и трелёвку произведённых на пасаках харвестером сортиментов в полностью погруженном положении на погрузочный пункт и раскладывает их в штабели соответствующих групп сортировки (фото 8) [76—78]. В СССР форвардеры практически не производились, если не считать машину ТБ-1М-15, созданную на базе гусеничного бесчokerного трактора ТБ-1М с колёсным полуприцепом [44].

Следует отметить, что у сортиментной технологии заготовки древесины тоже есть ряд преимуществ. Прежде всего, наличие на погрузочном пункте (или верхнем складе) уже отсортированных по породам и назначению штабелей сортиментов позволяет вывозить их непосредственно с лесосеки на биржу сырья потребителя, минуя нижний склад, что снижает себестоимость. Правда, при этом количество типоразмеров выпиливаемых сортиментов существенно сокращается, обычно не более 3—4. Кроме этого, благодаря трелёвке сортиментов в полностью погруженном положении, при скандинавской технологии лесосечных работ они засоряются частицами почвогрунта (особенно это важно в тёплый период года) [79—83].



Фото 8. Колёсный форвардер на погрузочном пункте [55]

Photo 8. Wheel forwarder at the loading point [55]

При канадской технологии лесосечных работ получаемые после работы процессора на верхнем складе сортименты также раскладываются в штабели соответствующих групп сортировки [84].

В европейских странах хлыстовая технология лесозаготовок почти не использовалась и не применяется, поэтому развитие лесных и лесозаготовительных машин шло по отличным от СССР направлениям. В европейских государствах, прежде всего в Скандинавских странах, для трелёвки заготавливаемых механизированным способом сортиментов использовались форвардеры, создаваемые на базе колёсных сельскохозяйственных тракторов. Если в СССР доминировали лесные машины с гусеничным двигателем, начиная с КТ-12, то в европейских странах — колёсные лесные машины, начиная с момента их разработки и развития [62], [85—87].

В дальнейшем для облегчения труда вальщиков и повышения производительности лесосечных работ были разработаны валочно-сучкорезно-раскряжёвочные агрегаты (харвестерные головки, импульсные и вальцовые) [74], [88—91]. Сначала они были довольно громоздкими, поэтому устанавливались не на гидроманипулятор, а на корпус машины-носителя. Таким образом, получался двухзахватный харвестер, у которого на свободном конце гидроманипулятора устанавливалось обычное ЗСУ, на корпусе (обычно на корме машины) размещали процессорный агрегат. Задачей оператора такого харвестера было подать поваленное дерево в процессорный агрегат, нажать кнопку породы, и если качество дерева позволяло обрабатывать его в автоматическом режиме, то пока выполнялась эта обработка, оператор мог валить следующее дерево. Далее, по мере совершенствования харвестерных агрегатов они становились более компактными и лёгкими, при этом скорость их работы возрастала и появилась возможность их установки на гидроманипулятор. Так появились хорошо знакомые однозахватные харвестеры (фото 9) [92].



Фото 9. Гусеничный однозахватный харвестер [107]

Photo 9. Tracked single-grip harvester [107]

Харвестеры, как и другие лесные машины, по виду движителя подразделяются на колёсные и гусеничные. Первые собираются на специальных колёсных базах, вторые — на базе модернизируемых экскаваторов [52], [53], [92], [93].

Поскольку харвестерные агрегаты в нашей стране не разрабатывались и не производились, то не создавались у нас и харвестеры. В последние годы существования СССР и в постсоветской России они импортировались, в основном из Скандинавских стран. Сначала отечественные лесозаготовительные предприятия закупали, в основном, гусеничные харвестеры — они проще по устройству, дешевле, но обладают не лучшей эргономикой и, соответственно, производительностью. Затем наступил период, когда отечественные лесозаготовительные компании начали закупать, в основном, колёсные харвестеры ведущих иностранных фирм-производителей такой техники — «Джон Дир» (около 70 %), «Комацу» (около 10 %), «Понссе» (около 20 %), «Роттне», «Логлифт», «Локсет» и др. (единичные). Колёсные харвестеры отличаются лучшими условиями эргономики, соответственно, большей производительностью (примерно на 20 %) при прочих равных условиях, но они дороже и требуют от операторов больших навыков [94], [95].

В связи с практически полным уничтожением производства отечественных лесных и лесозаготовительных машин российские лесопромышленные компании перешли на закупку импортных лесных агрегатов, как сейчас принято называть, из недружественных стран. Закупаемые лесозаготовительные машины в большей части являлись колёсными харвестерами. В значительно меньшем количестве, в основном для Сибири, закупались ВПМ. Соответственно, в России с каждым годом всё большую долю занимала сортиментная технология лесозаготовок. После вступления в силу действующих Правил дорожного движения, которые запрещают хлыстовозам выезжать на дороги общего пользования, сортиментная технология лесозаготовок достаточно быстро пересекла рубеж в 90 % от объёма всей заготавливаемой древесины в России [96], [97].

Как показал анализ работы действующих в России лесозаготовительных организаций, хлыстовая заготовка осталась у небольшого количества крупных лесозаготовительных предприятий, организующих плотовой сплав пучков хлыстов и/или имеющих возможность строить достаточно широкую сеть собственных лесовозных дорог. При этом для разделки хлыстов на нижних складах используются импортные раскряжёвочно-сортировочные агрегаты (обычно производимые по индивидуальным заказам), в составе которых находятся сканеры и рентген-аппараты, позволяющие учесть все видимые и скрытые пороки и при помощи специального программного обеспечения выбрать оптимальную программу раскрытия каждого хлыста [98—100].

С началом Специальной военной операции и введением пятого пакета санкций приобрести импортные лесные машины производства недружественных стран, а также запасные части и расходные материалы к ним стало чрезвычайно сложно и дорого. Как уже было отмечено, они приобретались, в основном, в Европе, а также в США и Японии. Белорусская компания «Амкодор», а также её дочернее предприятие «Амкодор-Онего» пока

не могут удовлетворить потребности российского рынка на харвестеры и форвардеры ни по количеству, ни по качеству. С началом санкционной войны, развязанной против Российской Федерации странами коллективного Запада, отечественные компании, ранее являвшиеся дилерами заводов лесного машиностроения из недружественных стран, переориентировались на поставки гусеничных харвестеров на базе китайских экскаваторов, например, компании «Льюгонг». Но на них по-прежнему устанавливаются харвестерные головки производства западных компаний, получаемые по схемам параллельного импорта. По мере обновления парка лесных машин отечественными лесозаготовительными компаниями доля гусеничных лесозаготовительных машин опять начинает расти, что хорошо видно из диаграммы на рисунке 3.

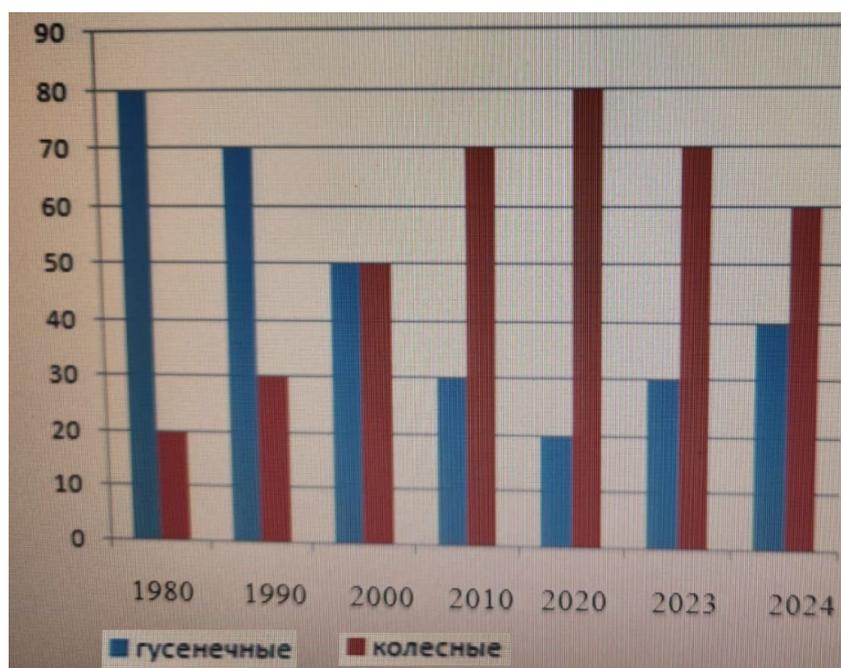


Рисунок 3. Соотношение гусеничных и колёсных лесных машин в России в различные периоды [рисунок авторов]

Figure 3. The ratio of tracked and wheeled forest vehicles in Russia in different periods

Кроме того, несмотря на закрытие Онежского и Алтайского тракторных заводов, в Российской Федерации постепенно восстанавливается производство гусеничных лесных тракторов. Пока в небольших количествах, но такие производства есть, например, ООО «Алтайский Завод Самоходных Машин "Прогресс"» производит усовершенствованный вариант ТТ-4 под маркой МСН-10. Правда, известные нам отзывы покупателей этих машин, как и машин компании «Амкордор-Онего», содержат определённое количество негатива.

В настоящее время, как уже было отмечено, в Российской Федерации доминируют сортиментные технологии заготовки древесины. При полностью механизированном

варианте проведения лесосечных работ для их реализации в состав систем машин включаются харвестеры (при реализации скандинавской технологии) или ВПМ (при осуществлении канадской технологии).

3. Результаты

3.1. Универсальные лесные машины — одномашинные лесозаготовительные комплексы

Как было отмечено выше, в случае вывозки из леса заготовленной древесины в виде деревьев с кроной и их погрузки на автолесовозы методом самопогрузки — при помощи установленного на автолесовоз гидроманипулятора (фото 10) или лебёдки со скользящей канатной оснасткой для выполнения всего комплекса лесосечных работ — валки деревьев, их трелёвки и штабелёвки на погрузочном пункте достаточно одной машины — ВТМ, и в этом случае она представляет собой одномашинный лесозаготовительный комплекс или универсальную лесозаготовительную машину [28—32], [101], [102].



Фото 10. Самопогружающийся автолесовоз (с гидроманипулятором) [42]

Photo 10. Self-loading logging truck (with hydraulic manipulator) [42]

Но практика вывозки деревьев с кроной не получила большого распространения, прежде всего, из-за крайне низкого коэффициента полндревесности веза. Поэтому ВТМ в качестве универсальных лесных машин практически никогда не рассматривались и обычно являлись головной машиной в системе: ВТМ + сучкорезная машина (СМ) + погрузчик (П) [44].

Первыми по-настоящему универсальными лесозаготовительными машинами, выпускаемыми серийно, явились валочно-сучкорезно-раскряжёвочно-трелёвочные машины, на практике называемые харвардерами (фото 11). Из русского названия этих машин видно, что они производят сортименты на пасеке, после чего трелюют их на погрузочный пункт

и укладывают в штабели у фронта отгрузки [102]. Как и харвестеры, харвардеры прошли свой путь развития от двухзахватных к однозахватным. Машины такой компоновки в небольших количествах поставлялись и в Россию, например Валмет 911 Комби, но большого распространения они не получили [102]. Это связано с тем, что, совмещая выполнение всех операций основного технологического процесса лесосечных работ — производства сортиментов, их трелёвки и штабелевки, они не могут выдать большие показатели производительности, как, например, классический двухмашинный комплекс, включающий харвестер и форвардер (X + Ф) [102].



Фото 11. Однозахватный харвардер [102]

Photo 11. Single-grip harvester [102]

Крупным и средним лесопромышленным компаниям, которые имеют финансовые возможности приобрести такую дорогую технику, нужна большая производительность. Харвардеры показывают хорошие результаты при освоении небольших разрозненных лесосек. Такой лесосечный фонд больше характерен для мелких и малообъёмных лесозаготовительных предприятий, которые не имеют финансовой возможности приобретать дорогие лесозаготовительные машины и обычно выполняют рабочие операции основного технологического процесса при помощи универсальных бензиномоторных пил (опять-таки импортных), а трелёвку, обычно, при помощи колёсных сельскохозяйственных тракторов, например МТЗ [103—106].

Следующим классом универсальных лесозаготовительных машин явились форвестеры. Принципиально это тоже валочно-сукорезно-раскряжёвочно-трелёвочные машины. Их главное отличие от харвардеров состоит в том, что харвардер (как хорошо видно на фото 11) — это одновременно и харвестер, и форвардер, а форвестер — попеременно

харвестер, а затем форвардер. Форвестеры делаются на базе форвардеров (фото 12) [107]. Во время работы харвардер нарезает получаемые сортименты сразу в тележку, а после её наполнения трелюет их на погрузочный пункт. Форвестер сначала оборудуется в харвестер — путём снятия коников тележки для сортиментов и установки на гидроманипулятор харвестерной головки, после чего работает в режиме обычного харвестера. Напилив определённое количество сортиментов, форвестер перемещается на погрузочный пункт (харвестерная головка меняется на рейферный захват, устанавливаются коники тележки для сортиментов, т. е. он переоборудуется в форвардер) и едет собирать ранее произведённые сортименты [107].

До пандемии Covid-19 форвестеры получили определённую популярность у российских лесозаготовительных предприятий, в т. ч. и в связи с постепенной дефрагментацией лесосечного фонда. Но после пандемии началась Специальная военная операция, была объявлена санкционная война. Харвардеры и форвестеры представляют собой универсальные лесозаготовительные машины для реализации скандинавской технологии лесосечных работ и в настоящее время в Россию не поставляются. Владельцы уже имеющихся машин сталкиваются со значительными трудностями в плане поддержания их в работоспособном состоянии.

Принципиально иной универсальной лесозаготовительной машиной, выпускаемой серийно, является валочно-трелёвочно-процессорная машина (ВТПМ), которая хорошо подходит как для реализации канадской сортиментной технологии лесосечных работ, так и для хлыстовой технологии. После небольшой модернизации, заключающейся в установке кониковой корзины для сортиментов вместо коникового зажима, ВТПМ может быть превращена в харвардер. В классической компоновке ВТПМ представляет собой ВТМ, у которой вместо ЗСУ установлена харвестерная головка.

Необходимо отметить, что концепт ВТПМ как на колёсном, так и на гусеничном шасси (на базе тракторов ОТЗ) в своё время был достаточно подробно обоснован коллективом учёных Петрозаводского государственного университета под руководством доктора технических наук, профессора И. Р. Шегельмана (рисунки 4 и 5). Часть результатов этой работы в 2011 г. была представлена в виде кандидатской диссертации П. В. Будника [23—27]. К сожалению, ликвидация ОТЗ не дала шансов на воплощение механизмов, представленных на рисунках 4 и 5. Но за рубежом ВТПМ успешно производят на колёсной ходовой части (фото 13, рисунок 6).

Но, как было указано выше, ВТПМ успешно производятся за рубежом, как и подавляющее большинство импортных лесных машин на колёсных шасси (фото 13, рисунок 6). Лидером в производстве ВТПМ является австрийская семейная компания KONRAD Forsttechnik GmbH. Несмотря на то, что Австрия относится к недружественным странам, компания KONRAD Forsttechnik GmbH поставляет в Россию технику собственного производства. Как было отмечено во введении, в настоящее время (2024 г.) эти машины проходят производственные испытания в природно-производственных условиях Иркутской области.

Испытания проводятся дилером компании KONRAD Forsttechnik GmbH — ООО «КОНРАД РУССЛАНД». Компания KONRAD Forsttechnik GmbH производит ВТПМ с колёсными формулами 4к4, 6к6 и 8к8. Компания KONRAD Forsttechnik GmbH специализируется на выпуске техники для разработки лесов на склонах.



Фото 12. Форвестер PONSSE BUFFALO DUAL в режиме харвестера [107]

Photo 12. PONSSE BUFFALO DUAL harvester in harvester mode [107]

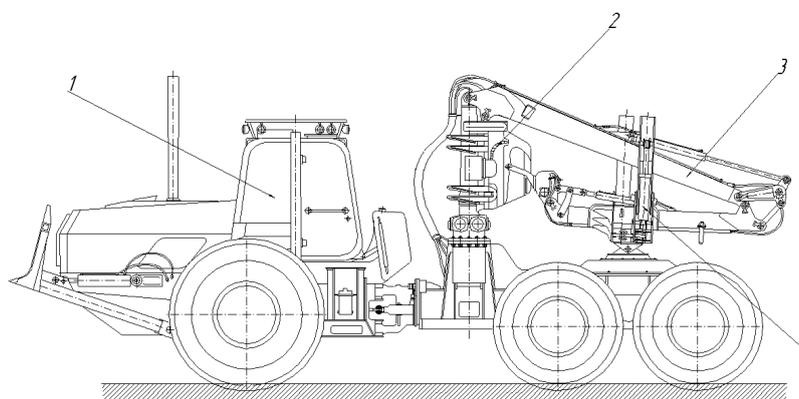


Рисунок 4. ВТПМ на базе колёсного лесопромышленного трактора ТЛК 6-02: 1 — колёсное шасси; 2 — харвестерная головка; 3 — гидроманипулятор; 4 — кониковый зажим [24]

Figure 4. VTP based on the TLK 6-02 wheeled timber tractor: 1 — wheeled chassis; 2 — harvester head; 3 — hydraulic manipulator; 4 — conical clamp [24]

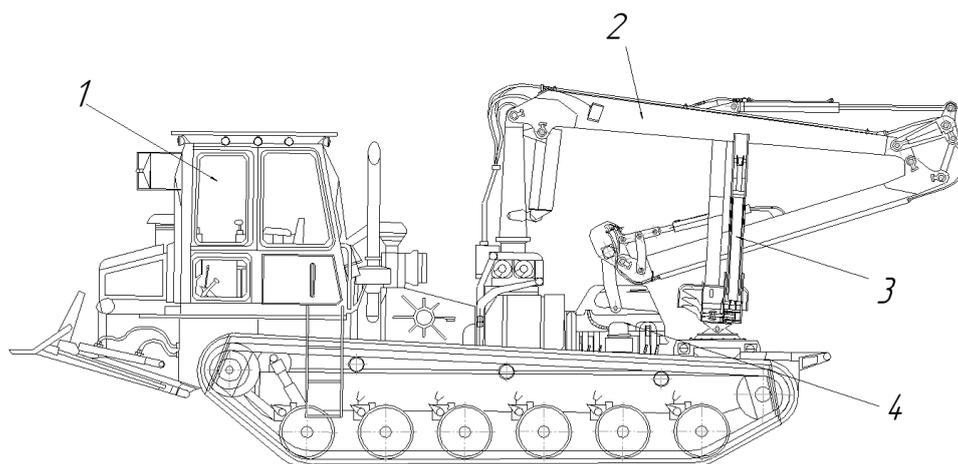


Рисунок 5. ВТПМ на базе гусеничного лесопромышленного трактора: 1 — гусеничное шасси; 2 — гидроманипулятор; 3 — кониковый зажим; 4 — харвестерная головка [24]

Figure 5. VTPM based on a tracked timber tractor: 1 — tracked chassis; 2 — hydraulic manipulator; 3 — conical clamp; 4 — harvester head [24]



Фото 13. Внешний вид ВТПМ Highlander компании KONRAD Forsttechnik GmbH [28]

Photo 13. Outside appearance of the VTPM Highlander by KONRAD Forsttechnik GmbH [28]

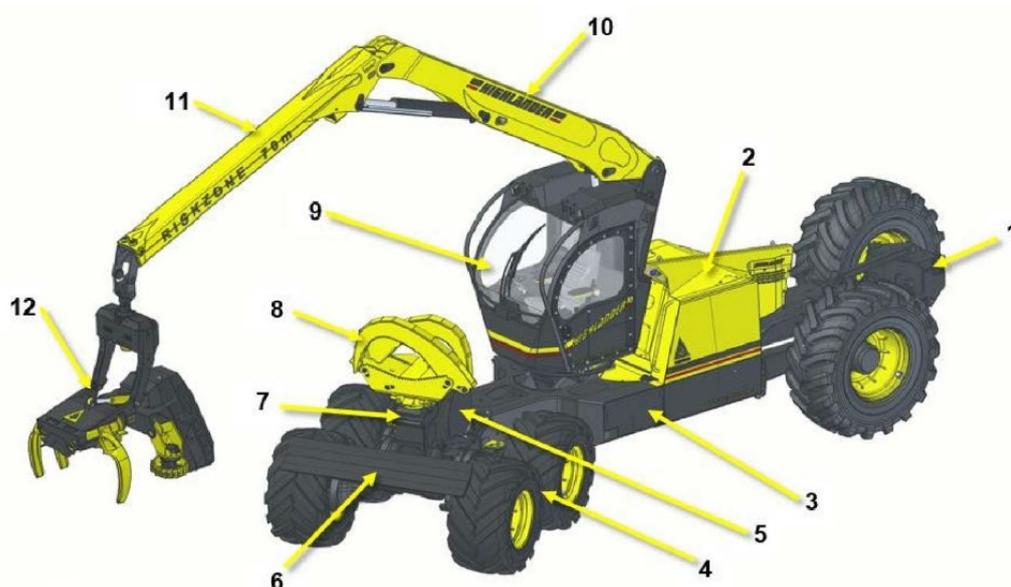


Рисунок 6. Основные узлы ВТПМ Highlander компании KONRAD Forsttechnik GmbH: 1 — механизм качания задних колёс; 2 — дизельный двигатель; 3 — несущая рама с удлинителем привода задних колёс; 4 — передняя тандемная тележка, NAF; 5 — короб лебёдки (опция); 6 — толкатель (опция); 7 — быстросъёмная опорная плита; 8 — зажимный коник (опция); 9 — кабина оператора; 10 — рукоять гидроманипулятора; 11 — стрела гидроманипулятора; 12 — харвестерная головка WOODY [28]

Figure 6. The main components of the VTPM Highlander of KONRAD Forsttechnik GmbH: 1 — Rear wheel swing mechanism; 2 — Diesel engine; 3 — Load-bearing frame with rear wheel drive extension; 4 — Front tandem trolley, NAF; 5 — Winch box (optional); 6 — Pusher (optional); 7 — Quick-release base plate; 8 — Clamping cone (optional); 9 — Operator's cabin; 10 — Hydraulic manipulator handle; 11 — Hydraulic manipulator boom; 12 — WOODY harvester head [28]

ВТПМ компании KONRAD Forsttechnik GmbH в принципе являются на настоящий момент наиболее технологически универсальными, поскольку могут работать в нескольких режимах [28—32]:

- Валка — трелёвка — обрезка сучьев — раскряжёвка — штабелёвка (классический вариант).
- Валка — пакетирование (по аналогии с рассмотренным выше вариантом ВТМ в режиме ВПМ).
- Валка — обрезка сучьев — сбор пачки — трелёвка — раскряжёвка — штабелёвка (при работе на слабонесущих почвогрунтах обрезка сучьев производится на пасеке с укладкой порубочных остатков на волокна для их укрепления).

- Валка — обрезка сучьев — сбор пачки — формирование пакета [также при работе на слабонесущих почвогрунтах при работе в режиме ВПМ (рисунок 7)].
- В режиме ВТМ.
- Валка — трелёвка — обрезка сучьев — штабелёвка (при потребности в реализации хлыстовой технологии).
- Валка — обрезка сучьев — сбор пачки — трелёвка — штабелёвка (при работе на слабонесущих почвогрунтах при необходимости реализации хлыстовой технологии).
- В режиме харвестера.
- В режиме процессора.
- В режиме харвардера.

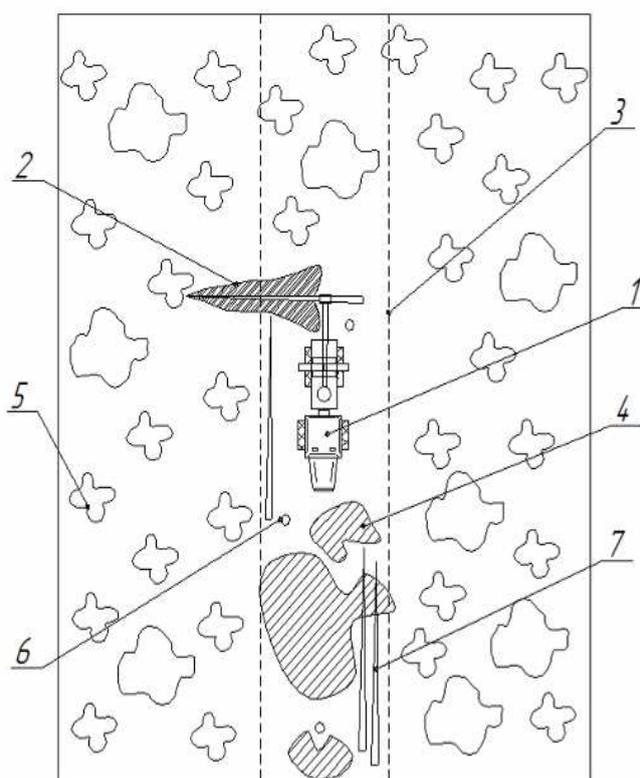


Рисунок 7. Технологическая схема работы ВТПМ при обрезке сучьев на пасеке: 1 — ВТПМ; 2 — поваленное дерево; 3 — граница волока; 4 — отделённая кроновая часть деревьев; 5 — стоящее дерево; 6 — пень; 7 — хлысты [25]

Figure 7. Technological scheme of VTPM operation of tree limbing on forest swath: 1 — VTPM; 2 — fallen tree; 3 — logging road boundary; 4 — separated crown of trees; 5 — detached tree; 6 — stump; 7 — tree-length logs [25]

В данном перечне не были учтены нерациональные технологические варианты, такие как работа в режиме просто валочной машины или валочно-сучкорезной машины. Конечно, сбор

пачки полученных после обрезки сучьев хлыстов представляет собой некоторую технологическую сложность, но если при валке и обрезке сучьев ориентировать хлысты вершинами в сторону магистрального трелёвочного волока, то появляется возможность набирать в кониковый зажим пачку большего объёма за вершины.

Важно отметить, что ВТПМ является для российских лесозаготовителей совершенно новым концептом лесозаготовительной техники, к которой ещё предстоит привыкнуть, но её отличная проходимость и манёвренность, вкупе с высокой надёжностью за счёт хорошо отработанной конструкции, а также уникальной технологической универсальностью и, что очень важно в настоящее время, доступностью для отечественных лесозаготовительных компаний, делает ВТПМ компании KONRAD Forsttechnik GmbH самым предпочтительным видом универсальных лесных машин.

Основные технические характеристики ВТПМ Highlander 4WD (с колёсной формулой 4к4) компании ООО «КОНРАД РУССЛАНД» представлены в таблице. Также важно отметить, что особенности используемой в ВТПМ Highlander харвестерной головки WOODY-61 позволяют ей, при необходимости, также выполнять и погрузку сортиментов на автолесовозы. Кабина ВТПМ эргономичная, как у колёсного харвестера, безопасная, сертифицированная ROPS, FOPS, OPS. Защитное стекло по всей кабине 12 мм, поликарбонат. Привод обеспечивает круговое вращение кабины с манипулятором 360°. Гидроманипулятор установлен за кабину, что позволяет оператору получить максимальный обзор рабочей зоны. Машина имеет хороший пакет прикладных программ, в т.ч. позволяющий проводить своевременную диагностику текущего технического состояния [108]. Уже к концу 2024 г. возможно ожидать опубликования результатов производственных испытаний ВТПМ компании KONRAD Forsttechnik GmbH в природно-производственных условиях Иркутской области. Потенциальные пользователи этих машин получат информацию об удельном расходе топлива, о производительности, других важных для производителей показателях, но, к сожалению уже традиционно, за рамками программы испытаний ООО «КОНРАД РУССЛАНД» остались вопросы экологической совместимости современных ВТПМ с лесной средой, прежде всего, это касается воздействия на почвогрунты. Не предоставляет такие данные и компания KONRAD Forsttechnik GmbH.

В принципе при работе ВТПМ на равнине, для прогнозирования возможных последствий воздействия ВТПМ на почвогрунты, можно воспользоваться известными результатами отечественных и зарубежных учёных, которые выполнили очень значительный объём теоретических и экспериментальных исследований в области воздействия колёсных и гусеничных машин на почвогрунты. Но, как уже было отмечено выше, компания KONRAD Forsttechnik GmbH специализируется на выпуске техники для разработки лесов на склонах. В связи с этим ВТПМ Highlander также приспособлены для работы на склонах. Это касается и ходовой части, и опционального наличия лебёдки (позиция 5 на рисунке 6). Для условий Сибири и Дальнего Востока, где значительные запасы спелой и перестойной древесины расположены на склонах, это является существенным преимуществом [109], [110].

Но, по нашему мнению, прогнозирование воздействия колёсных ВТПМ и трелёвочных систем на их базе на почвогрунты лесосек на склонах требует отдельного теоретического и экспериментального изучения, хотя бы потому, что леса на склонах относятся к одним из наиболее антропогенно ранимых типов лесных экосистем [110], [111].

Таблица. Основные технические характеристики ВТПМ Highlander 4WD

Table. Main technical characteristics of the VTM Highlander 4WD

Показатель	Ед. изм.	Значение
Масса	т	19,7
Ширина	м	2,95
Высота базовой машины	м	3,56
Длина базовой машины	м	7,44
Дорожный просвет	м	0,7—1,4
Колёса передние / задние		710/70 × 34
Мощность двигателя	кВт	175
Трансмиссия		Гидростатически-механическая
Тяговое усилие	т	24
Скорость движения (лес / дорога)	км/ч	7—18
Объём топливного бака	л	340
Средний расход топлива	л/ч	15—18
Вылет гидроманипулятора	м	10,8
Грузоподъёмность коника	т	10
Площадь коникового зажима	м ²	1,8

3.2. Воздействие движителей лесных машин на почвогрунты лесосек

Прежде всего, следует привести определение понятия «почвогрунт». Согласно публикации [112], «почвогрунт — это многослойная система, состоящая из нескольких органических и одного или нескольких минеральных слоёв, с которыми движитель машины взаимодействует одновременно», т. е. почвогрунт — это слоёный пирог из элементов живого напочвенного покрова (ЖНП) и неразложившегося опада, под слоем которых находится полуразложившийся опад (полугумус), после него идёт слой гумуса (гумусовый горизонт), который затекает в лежащие под ним минеральные слои.

Лес — самый высокопроизводительный тип экосистем на Земле. Чтобы воспроизвести максимальное количество биомассы на единице площади, он забирает максимально возможное количество питательных веществ, сильно истончая толщину органических слоёв почвогрунта [113], [114]. Если на возделываемых в сельскохозяйственном производстве полях толщина почвенного слоя измеряется десятками сантиметров, то в лесах хвойно-

бореальной зоны это сантиметры. При этом развитые грунтозацепы движителей лесопромышленных тракторов, имеющие в среднем высоту 13—15 см, протыкают органические слои почвогрунта, внедряются в подстилающий минеральный слой и реализуют касательную силу движителя, отталкиваясь от всех слоёв почвогрунта одновременно.

Также и нормальная составляющая давления движителя воздействует на все слои почвогрунта одновременно, постепенно затухая по мере удаления от пятна контакта. Это хорошо иллюстрируется диаграммой, представленной на рисунке 8 [115].

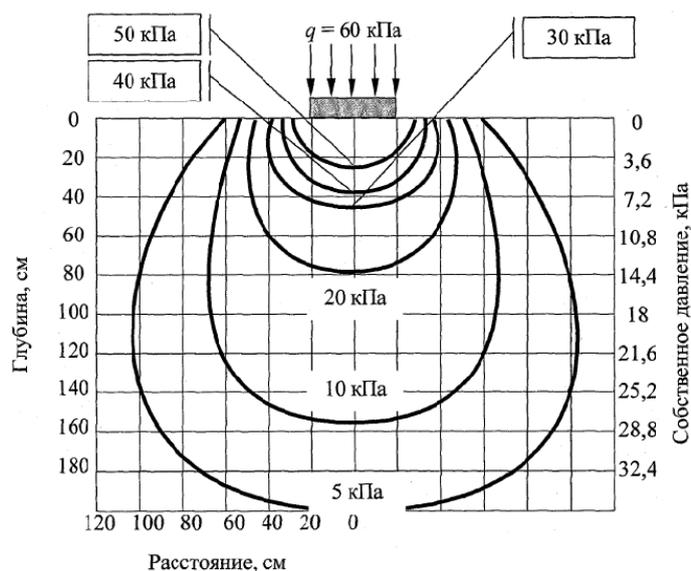


Рисунок 8. Эпюра дополнительных напряжений в идеальном почвогрунте и его собственное давление при плотности $1,8 \text{ г/см}^3$ [115]

Figure 8. A plot of additional stresses in an ideal soil and its own pressure at a density of 1.8 g/cm^3 [115]

К основным типам повреждения почвогрунта под воздействием движителей лесных машин принято относить [45], [47], [76], [85], [116], [117]:

- Уплотнение, сопровождающееся уменьшением пористости и порозности, что отрицательно влияет на корневое питание растений, снижает прирост.
- Колееобразование, происходящее из-за вдавливания почвогрунта в дно колеи, выдавливание почвогрунта по бокам колеи, а также срез почвогрунта под воздействием касательной силы тяги, реализуемой движителем машины в процессе её перемещения.

Механизм образования колеи проиллюстрирован на рисунке 9 [115].

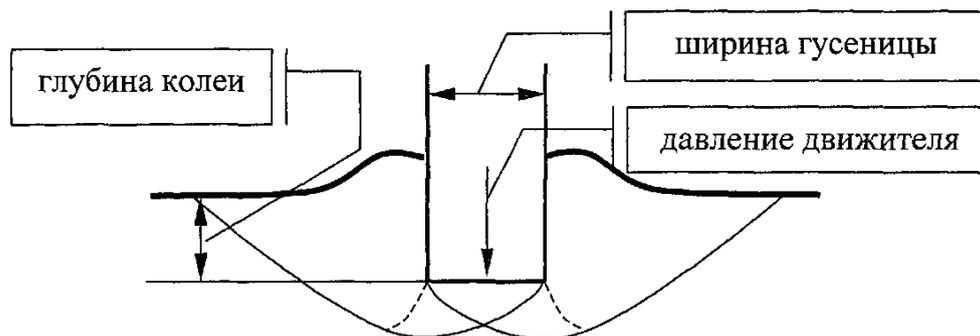


Рисунок 9. Схема колееобразования под воздействием движителя [115]

Figure 9. The scheme of track formation under the influence of a mover [115]

Выше уже было отмечено негативное влияние уплотнения почвогрунта на лесную экосистему. Но уплотнение, в большей части случаев, сопряжено с колееобразованием. В результате уплотнения дна колеи попадающая в неё вода застаивается, т. к. резкое снижение порозности не даёт ей уйти в нижние слои. Таким образом, колея от движителя лесной машины становится очагом водной эрозии, которая, в конечном итоге, может привести к развитию процессов заболачивания или оврагообразования [118], [119]. Колея, которая образовалась за один проход колёсной лесной машины (форвардера) по лесосеке, представлена на фото 14. Динамика образования колеи может быть различной, она зависит от силы воздействия движителя, нормальной и касательной, количества проходов по одному следу, а также от физико-механических свойств почвогрунта, в свою очередь зависящих от его сложения и влажности. На рисунке 10 представлены типовые варианты динамики колееобразования [115]. Отмеченное касается почвогрунтов на равнинной местности. В условиях склонов добавляется угловая составляющая, тем больше, чем круче склон [119], [120]. В результате часть нормальной силы тяжести лесной машины добавляется к касательным нагрузкам на почвогрунт, и это при том, что и сам почвогрунт испытывает касательную нагрузку от силы тяжести, которая после сильных дождей, при интенсивном снеготаянии или под действием эффекта солифлюкции на мерзлотных почвогрунтах может привести к самопроизвольному соскальзыванию пласта почвогрунта вниз по склону и без воздействия движителя машины [121].

Известно, что интенсивность роста глубины колеи при прочих равных условиях под воздействием колёсных лесных машин больше, чем под воздействием гусеничных или колёсных, оснащённых моногусеницами. Это связано с меньшим пятном контакта колёсных движителей с опорной поверхностью и, соответственно, большим давлением. Если же учитывать специфику воздействия движителя на почвогрунты на склонах, когда для перемещения машины вверх по склону необходимо реализовать большую касательную силу тяги, чем на равнине (при прочих равных условиях), то становится очевидным, что

интенсивность образования колеи может значительно возрасти [121]. Особенно если дополнительно учесть эффект пробуксовки движителя. Образующая в почвогрунтах на склонах колея значительно быстрее становится очагом водной эрозии, становясь водотоком, по которому осадки (дождь, талые воды), стекая вниз, смывают плодородный слой, подмывают бока колеи, корни оставленных на доращивание деревьев (фото 15).



Фото 14. Колея, образовавшаяся за один проход колёсной лесной машины (форвардера) по лесосеке [фото авторов]

Photo 14. The track formed during one pass of a wheeled forestry machine (forwarder) through a cutting area

Если ранее при освоении лесосек на склонах использовались канатные трелёвочные установки, гусеничные тракторы, то в настоящее время лесосеки на склонах в Сибири и на Дальнем Востоке осваивают, преимущественно, с помощью колёсных лесных машин, в основном харвестеров и форвардеров [110]. Обычно эти машины оснащают специальными колёсными моногусеницами для уменьшения давления на почвогрунт. Достаточно распространена практика использования встроенных в трансмиссию лебёдок. Как было указано выше, у ВТПМ Highlander компании KONRAD Forsttechnik GmbH такая опция также есть (см. рисунок 6). Правда, встроенная в трансмиссию лесной машины лебёдка её существенно удорожает и утяжеляет и не может быть самостоятельно демонтирована пользователем, когда в ней нет необходимости. Например, при переходе на разработку лесосек на равнине [110].

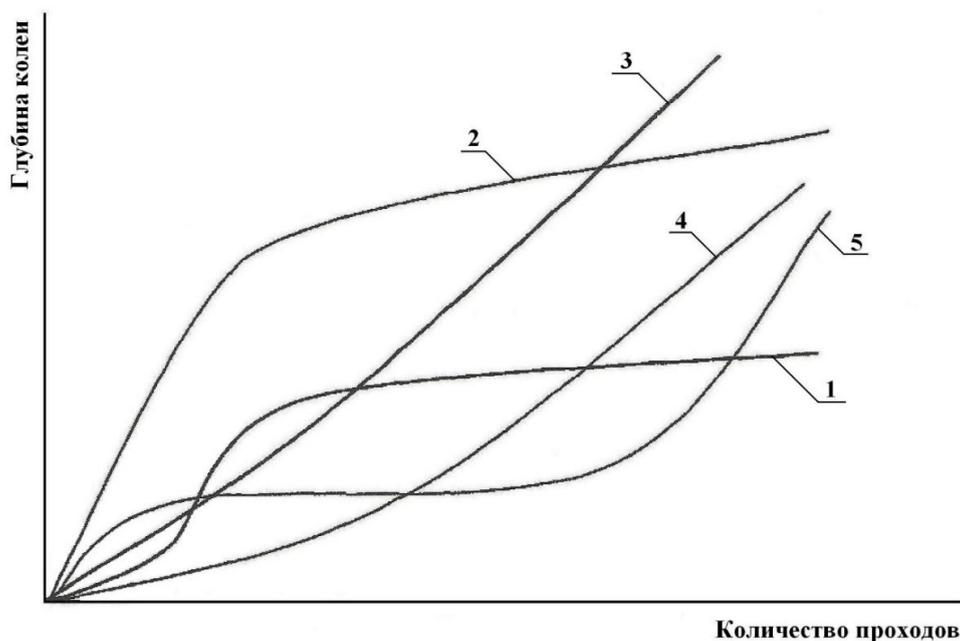


Рисунок 10. Типовые варианты динамики колееобразования: 1 — изменение колееобразования по логарифмическому закону; 2 — изменение колееобразования по логарифмическому закону с ускоренным проминанием колеи; 3 — нестабилизирующий рост глубины колеи; 4 — нестабилизирующий рост глубины колеи небольшой интенсивности; 5 — изменение колееобразования по логарифмическому закону с последующим резким ростом [115]

Figure 10. Typical variants of the track formation dynamics: 1 — change in track formation according to the logarithmic law; 2 — change in track formation according to the logarithmic law with accelerated track penetration; 3 — unstable increase in track depth; 4 — unstable increase in track depth of low intensity; 5 — change in track formation according to the logarithmic law followed by a sharp increase [115]

В настоящее время малораспространённым, но достаточно перспективным вариантом на лесозаготовительных предприятиях России является использование отдельных самоходных лебёдок, к которым можно попеременно прицеплять лесные машины, например, сначала лесозаготовительную, а потом трелёвочную [110], [122]. Интегрированная в трансмиссию или отдельная самоходная лебёдка позволяет значительно снижать касательную силу тяги, которую необходимо реализовать машине для подъёма на склон. Это, в свою очередь, позволяет значительно снижать интенсивность образования колеи (фото 16) [121].



Фото 15. Колея от воздействия движителя лесной машины на склоне [фото авторов]

Photo 15. The track from the impact of the forest machine mover on the slope

К наиболее свежим научным работам по исследуемой в настоящей работе проблеме можно отнести публикации [109], [110], [123—127], в совокупности защищённые в кандидатской диссертации До Туан Ань «Повышение эффективности работы гусеничных лесных машин в горных условиях Социалистической Республики Вьетнам». В данной работе автор пришёл к логичному выводу, что наиболее выгодным и средоохраняющим вариантом применения лесных машин на склонах является использование их в паре с самоходной лебёдкой. Им также было установлено, что «коэффициент сопротивления движению гусеничной машины, движущейся вдоль склона, определяется, главным образом, несущей способностью почвогрунта, соотношением среднего и допустимого давления движителя, углом склона» [127], и были получены выражения, позволяющие обосновать коэффициент энергонасыщенности машины, тяговое усилие лебёдки с учётом угла склона, который машина способна преодолеть по сцеплению, соотношения среднего давления движителя и несущей способности почвогрунта, веса машины.



Фото 16. Сравнительный вид последствий работ лесных машин на склоне с использованием и без использования лебёдки [121]

Photo 16. Comparative view of the consequences of forest machinery operations on the slope with and without the use of a winch [121]

Но, как было отмечено выше, в России, в основном, используются колёсные лесные машины. Кроме этого, использование лебёдок практикуется при разработке лесосек на достаточно протяжённых склонах — в горах или на сопках (например, Хабаровский край). На Северо-Западе России гор и сопок практически нет, но относительно коротких склонов достаточно много, например, при работе в условиях холмисто-рядовых рельефов, для которых характерны относительно короткие раздробленные склоны. В этих условиях лесозаготовители чаще всего не оснащают колёсные машины моногусеницами, т. к. машина то взбирается на склон, то дальше перемещается по равнине. При этом склоны, пусть и короткие, могут быть достаточно крутыми и на них образуется достаточно глубокая колея, вплоть до клиренса машины, со всеми вытекающими из этого негативными экологическими последствиями.

ВТПМ Highlander компании KONRAD Forsttechnik GmbH может быть весьма эффективной при реализации различных вариантов технологических процессов лесосечных работ, в разных природно-производственных условиях. Для обеспечения экономической и экологической эффективности её применения необходимо научно обосновать, при каких параметрах склона и физико-механических свойствах почвогрунта её целесообразно использовать со встроенной в трансмиссию лебёдкой и с моногусеницами (хотя модель с колёсной формулой 4к4 моногусеницами оснащена быть не может), когда только с лебёдкой или только с моногусеницами, а когда может использоваться на чисто колёсном двигателе.

4. Выводы

В настоящее время лесное машиностроение Российской Федерации по-прежнему находится в глубоком кризисе и не способно удовлетворить потребности отечественных лесозаготовительных предприятий в современных и эффективных лесных машинах, особенно для освоения лесов на склонах.

Универсальные лесозаготовительные машины, особенно валочно-трелевочно-процессорные отвечают современным потребностям лесозаготовительных предприятий, в части эффективности и доступности для приобретения.

Для повышения экологической и эксплуатационной эффективности ВТПМ при их работе в лесах на склонах необходимо теоретическое и экспериментальное изучение их воздействия на почвогрунты лесосек, с учетом угла склона, физико-механических свойств почвогрунта, конструктивных особенностей машины, с целью практического обоснования допустимых параметров колесного движителя ВТПМ, работающей на склоне.

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

Список литературы

1. Кузнецов А. В., Галактионов О. Н. Анализ производства лесозаготовительных машин в России // Инженерный вестник Дона. 2023. № 4 (100). С. 712—722.
2. Должиков И. С., Григорьев И. В. Перспективы использования тракторов малого класса тяги для импортозамещения в области лесного машиностроения РФ // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: Материалы Всерос. научно-практич. конф. / Под ред. Ю. М. Казакова [и др.]. Казань, 2023. С. 48—51.
3. Перспективные подходы к развитию отечественного лесного машиностроения / И. С. Должиков, А. С. Дмитриев, А. А. Кривошеев [и др.]. // Перспективные ресурсосберегающие технологии развития лесопромышленного комплекса: Материалы Междунар. научно-практич. конф. молодых учёных и студентов. Воронеж, 2023. С. 62—67.
4. Вернер Н. Н. Пути решения проблемы обеспечения предприятий лесного комплекса качественной и безопасной продукцией лесного машиностроения // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2023. № 1. С. 25—31.
5. Швецова В. В. Возможности лесотехнических вузов в развитии отечественного лесного машиностроения // 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. 154—157.
6. Григорьев И. В. Современные проблемы импортозамещения в лесном машиностроении Российской Федерации // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции

- и перспективы развития: Материалы Всерос. научно-практич. конф. / Отв. ред.: Ю. А. Безруких, Е. В. Мельникова. Красноярск, 2022. С. 165—169.
7. *Марков В. А., Иванов А. М.* Перспективы применения аддитивных технологий в лесном машиностроении // Сборник статей по материалам научно-технической конференции Института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2021: Материалы докл. конф. / Отв. ред. Е. Г. Хитров. Санкт-Петербург, 2022. С. 277—279.
 8. *Кузнецов А. В.* Проблематика развития лесного машиностроения в России // Лесозаготовка и комплексное использование древесины: Сб. ст. IX Всерос. научно-практич. конф. Красноярск, 2022. С. 58—62.
 9. *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.
 10. 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.
 11. *Курочкин П. А., Григорьев И. В., Григорьева О. И.* Новые подходы к проектированию лесопромышленного оборудования с учётом рисков в области безопасности и охраны труда // Перспективные ресурсосберегающие технологии развития лесопромышленного комплекса: Материалы Междунар. научно-практич. конф. молодых учёных и студентов. Воронеж, 2023. С. 72—77.
 12. *Петухов Р. А.* Лесопромышленный комплекс Республики Карелия: проблемы и решения // Перспективы науки. 2020. № 1 (124). С. 18—20.
 13. *Шегельман И. Р., Васильев А. С.* К вопросу создания базовых лесных машин с комплектом многофункционального технологического оборудования для экономически эффективного и экологически безопасного освоения лесных ресурсов // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 67-2. С. 63—65.
 14. *Колотвина Ю. В., Палкин Е. В.* Новинки импортозамещения для лесозаготовки — форвардеры AMKODOR // Лесозаготовка и комплексное использование древесины: Сб. ст. IX Всерос. научно-практич. конф. Красноярск, 2022. С. 46—50.
 15. *Колотвина Ю. В., Палкин Е. В.* Успешное выполнение программы импортозамещения машин AMKODOR // Лесозаготовка и комплексное использование древесины: Сб. ст. IX Всерос. научно-практич. конф. Красноярск, 2022. С. 50—54.
 16. *Савинова Ю. А., Палкин Е. В.* AMKODOR-ОНЕГО — флагман импортозамещения российского лесного машиностроения // Лесозаготовка и комплексное использование древесины: Сб. ст. Всерос. научно-практич. конф. Красноярск, 2020. С. 169—173.
 17. Технологические аспекты безопасной работы вальщиков леса на горных склонах / В. А. Каляшов, Т. А. До, О. И. Григорьева [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 2. С. 4—10.
 18. 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 производствах. 2022. № 2. С. 11—25.

19. Современные системы машин и технологии заготовки древесины и лесовосстановления в условиях горных лесосек / В. А. Каляшов, Т. А. До, Е. Г. Хитров [и др.] // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 2. С. 1—47.
20. Каляшов В. А., До Т. А., Новгородов Д. В. Сравнение систем машин для заготовки древесины на склонах гор и сопок // Лесозаготовка и комплексное использование древесины: Сб. ст. IX Всерос. научно-практич. конф. Красноярск, 2022. С. 42—46.
21. Теоретическое обоснование допустимого среднего давления на грунт движителя лесной машины, работающей на склоне / Т. А. До, Г. В. Григорьев, В. А. Каляшов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 2 (54). С. 72—77.
22. Шегельман И. Р., Будник П. В. Обоснование вылета манипулятора и режимов работы валочно-трелёвочно-процессорной машины // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2011. № 4 (117). С. 81—83.
23. Будник П. В. Обоснование максимального вылета манипулятора валочно-трелёвочно-процессорной машины для различных природно-производственных условий // Севергеоэкотех-2011: Материалы XII междунар. молодёж. науч. конф.: В 5 ч. Ухта: Ухтинский гос. техн. ун-т, 2011. С. 16—21.
24. Валочно-трелёвочно-процессорная машина / И. Р. Шегельман, В. И. Скрыпник. Патент на полезную модель. Заявка № 200914475422(063722).
25. Баклагин В. Н., Будник П. В. Обоснование универсальной лесозаготовительной машины для заготовки сортиментов и технологического процесса производства топливной щепы мобильными рубительными машинами на лесосеке / Карел. научно-исследовател. ин-т лесопромышл. комплекса Петрозав. гос. ун-та. Петрозаводск, 2008. 22 с.: ил., библ. 4. Деп. в ВИНТИ РАН 04.08.2008, № 660-B2008.
26. Будник П. В., Скрыпник В. И. Обоснование масс и объёмов пачек деревьев, трелюемых валочно-трелёвочно-процессорной машиной с учётом природно-производственных условий и районов лесозаготовок // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2010. № 27. С. 3—6.
27. Способ выполнения лесосечных работ агрегатной машиной / И. Р. Шегельман, П. В. Будник, В. И. Скрыпник, В. Н. Баклагин. Патент на изобретение RU 2426303 С2, 20.08.2011. Заявка № 2009109914/21 от 18.03.2009.
28. Технологический анализ вариантов использования валочно-трелёвочно-процессорных машин / О. А. Куницкая, А. А. Кривошеев, А. С. Швецов [и др.] // Resources and Technology. 2024. Т. 21, № 2. С. 51—82.
29. Рациональные приёмы выполнения рубок лесных насаждений универсальной лесозаготовительной машиной / А. С. Швецов, А. А. Кривошеев, И. С. Должиков [и др.] // Вестник АГАТУ. 2024. № 1 (13). С. 48—65.
30. Технология раз рубки трасс линейных объектов универсальной лесозаготовительной машиной / А. С. Швецов, И. С. Должиков, И. В. Григорьев [и др.] // Вестник АГАТУ. 2024. № 2 (14). С. 104—121.
31. Технологические процессы сплошных и выборочных рубок леса при помощи универсальных лесозаготовительных машин / О. А. Куницкая, А. А. Кривошеев, А. С. Швецов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 4 (60). С. 106—112.
32. Основные правила безопасной эксплуатации универсальных лесозаготовительных машин / О. А. Куницкая, А. А. Кривошеев, А. С. Швецов [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2023. № 6. С. 33—42.

33. 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.
34. 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.
35. Куницкая О. А., Степанова Д. И., Григорьев М. Ф. Перспективные направления развития транспортно-технологических систем лесного комплекса России // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Материалы междунар. научно-практич. конф. / Под общ. ред. В. А. Гулевского. Воронеж, 2018. С. 109—114.
36. Одлис Д. Б., Шегельман И. Р. Анализ состояния лесного машиностроения в дореформенной экономике Карелии и выбор перспективных направлений его развития // Микроэкономика. 2012. № 1. С. 73—75.
37. Александров В. А. К 100-летию со дня рождения С. Ф. Орлова // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2010. № 190. С. 229—232.
38. Анисимов Г. М., Кочнев А. М. Основные направления повышения эксплуатационной эффективности гусеничных трелёвочных тракторов. СПб.: Политехн. ун-т, 2007. 456 с.
39. Анализ влияния природно-производственных условий на производительность тракторной трелёвки / О. А. Куницкая, А. В. Петров, А. А. Кривошеев [и др.] // Вестник АГАТУ. 2023. № 4 (12). С. 102—149.
40. Рудов С. Е., Вернер Н. Н. Анализ энергонасыщенности транспортных лесных машин // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2016. С. 274—278.
41. Тенденции развития современного российского лесного машиностроения / И. Р. Шегельман, В. И. Скрыпник, А. В. Кузнецов [и др.] // Инженерный вестник Дона. 2016. № 2 (41). С. 30.
42. 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.
43. Основные ошибки вальщиков, приводящие к выходу из строя бензиномоторных пил / А. В. Гончаров, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2018. № 10. С. 17—21.
44. Технология и машины лесосечных работ / В. И. Пятакин, И. В. Григорьев, А. К. Редькин [и др.]. СПб., 2012. 362 с.
45. Куницкая О. А., Никитина Е. И. Экологические аспекты выборочных рубок леса // Эколого-экономические и технологические аспекты устойчивого развития Республики Беларусь и Российской Федерации: Сб. ст. III Междунар. научно-техн. конф. «Минские научные чтения — 2020»: В 3 т. / Белорус. гос. технол. ун-т, Представительство федер. агентства по делам СНГ, соотечественников, проживающих за рубежом, и по междунар. гуманитар. сотрудничеству (Россотрудничество) в Республике Беларусь. Минск, 2021. С. 286—291.
46. Майко И. П., Матвейко А. П., Фридрих А. П. К применению срезающих устройств силового резания // Механизация лесоразработок и транспорт леса: Республикан. межведомств. сб. / Белорус. технол. ин-т им. С. М. Кирова. Минск, 1979. С. 9—13.
47. Оценка экологической безопасности работы лесных машин / А. И. Никифорова, О. И. Григорьева, Д. С. Киселев [и др.] // Природные ресурсы и экология Дальне-

- восточного региона: Материалы Междунар. научно-практич. форума. Хабаровск, 2013. С. 134—138.
48. *Грязин В. А.* Энергоёмкость как фактор производительности валочно-трелёвочных машин // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2009. № 2. С. 54—58.
49. *Высоцкий М. С., Коробкин В. П., Жуков А. В.* Концепция разработки машин для лесозаготовительных работ // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 2: Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2000. № 8. С. 34—43.
50. Организационно-технические решения для повышения коэффициента технической готовности лесных машин / О. А. Куницкая, А. А. Просужих, А. Б. Давтян [и др.] // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Материалы Междунар. научно-практич. конф. Воронеж, 2020. С. 162—167.
51. Совершенствование конструкции валочно-пакетирующей машины / И. В. Григорьев, И. И. Тихонов, А. И. Никифорова [и др.] // Справочник. Инженерный журнал. 2014. № 2 (203). С. 57—60.
52. 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.
53. *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.
54. *Никитина Е. И., Куницкая О. А., Николаева Ф. В.* Проект организации лесозаготовок в условиях Алданского лесничества с применением многооперационных лесозаготовительных комплексов // Современные проблемы и достижения аграрной науки в Арктике: Сб. науч. ст. по материалам Всерос. студ. научно-практич. конф. с междунар. участием в рамках «Северного форума — 2020» (29—30 сент. 2020 г., Якутск) и Междунар. науч. онлайн летней школы — 2020 (6—20 июля 2020 г., Якутск). Якутск, 2020. С. 138—148.
55. *Куницкая О. А., Никитина Е. И., Николаева Ф. В.* Особенности лесозаготовки в Республике Саха Якутия // Управление земельными ресурсами, землеустройство, кадастр, геодезия и картография. Проблемы и перспективы развития: Сб. материалов Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием, посвящённой 255-летию Землеустройства Якутии и Году науки и технологий. Якутск, 2021. С. 308—313.
56. *Жуков А. В., Федоренчик А. С., Клоков Д. В.* Воздействие движителей лесных колёсных машин на почву и показатели их проходимости // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 2: Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 1998. № 6. С. 11—17.
57. *Григорьев И. В., Куницкая О. А., Давтян А. Б.* Современное технологическое оборудование валочных и харвестерных машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 7. С. 9—16.
58. Основы повышения эффективности систем машин для создания и эксплуатации лесных плантаций / А. Б. Давтян, О. А. Куницкая, М. Ф. Григорьев [и др.] // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. № 56. С. 19—22.
59. Оценка эффективности создания и эксплуатации энергетических лесных плантаций / А. Б. Давтян, О. А. Куницкая, М. Ф. Григорьев [и др.] // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Материалы Междунар. научно-практич. конф. Воронеж, 2019. С. 61—65.

60. 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.
61. 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 Землеустройства Якутии и Году науки и технологий. Якутск, 2021. С. 271—278.
62. Расчёт тяговых и сцепных свойств колёсного скиддера с использованием данных зарубежных коллег / С. Е. Рудов, Е. Г. Хитров, М. Е. Рудов [и др.] // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 1 (12). С. 223—228.
63. Матвейко А. П. Расчёт производительности валочных и валочно-пакетирующих машин // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1989. № 4. С. 36—38.
64. Юдина Н. Ю. Анализ факторов, влияющих на производительность валочных, валочно-пакетирующих машин // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров оборудования и систем управления лесного комплекса: Сб. науч. тр. / Под ред. В. С. Петровского. Воронеж: Воронеж. гос. лесотехн. академия, 1997. С. 37—40.
65. Гуцина Д. А., Даниленко О. К. К вопросу о повышении эффективности технологического процесса лесосечных работ // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2018. № 52. С. 6—9.
66. Даниленко О. К., Сухих А. Н. О многообразии факторов, влияющих на эффективность лесозаготовительного производства // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 2. С. 239—244.
67. Суханов В. С. О развитии технологии лесозаготовок в России // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2012. № 4. С. 46—49.
68. Александров В. А. Ещё раз о хлыстовой технологии // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2013. № 2 (332). С. 108—114.
69. Повышение эффективности заготовки сырья для мацтопропиточных заводов при проведении лесосечных работ / О. А. Куницкая, И. И. Тихонов, С. С. Бурмистрова [и др.] // Научное обозрение. 2011. № 4. С. 78—83.
70. Оптимизация процесса раскряжёвки хлыстов на лесоперевалочных базах лесных холдингов при выпилровке сырья для мацтопропиточных заводов / О. А. Куницкая, И. И. Тихонов, Д. Е. Куницкая [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2014. № 3 (339). С. 86—93.
71. Дербин В. М., Дербин М. В. Сортиментная заготовка древесины при выборочных рубках // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2016. № 5 (353). С. 123—131.
72. Дербин В. М., Дербин М. В. Технология работы харвестера при выборочных рубках // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6, № 2 (22). С. 69—75.
73. Improving the efficiency of forest companies by optimizing the key indicators of sustainable forest management: a case study of the Far East / P. B. Ryabukhin, O. A. Kunitskaya, A. M. Burgonutdinov [et al.] // Forest Science and Technology. 2022. Vol. 18, no. 4. P. 190—200.
74. Проблемы безопасной эксплуатации пильных цепных гарнитур лесных машин / А. С. Швецов, С. А. Серяков, П. А. Курочкин [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2024. № 2 (14). С. 24—35.

75. Григорьев И. В., Петров М. Е. Дополнительные технические опции для повышения безопасности, надёжности и энергоэффективности лесных машин // Вестник АГАТУ. 2021. № 3 (3). С. 73—81.
76. 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.
77. Влияние переменных коэффициентов сопротивления движению и сцепления на производительность форвардера / О. Н. Бурмистрова, А. А. Просужих, Е. Г. Хитров [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. 2021. № 1. С. 3—16.
78. Анализ конструкций и технологий работы форвардеров на лесозаготовках / Л. Д. Бухтояров, В. В. Абрамов, А. А. Просужих [и др.] // Resources and Technology. 2020. Т. 17, № 3. С. 1—35.
79. Печерин В. В., Чикулаев П. С. Сортиментная заготовка леса в Республике Карелия // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. 2005. № 6. С. 43—46.
80. Залесов С. В., Оплетев А. С., Зверев А. А. Перспективы использования сортиментной технологии лесозаготовок // Аграрная Россия. 2009. № S2. С. 25—27.
81. Матросов А. В., Быковский М. А. Моделирование работы и оценка эффективности системы лесосечных машин // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2013. № 1. С. 107—111.
82. 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.
83. Практика проведения машинных рубок ухода по скандинавской технологии в Пермском крае / О. И. Григорьева, Н. А. Бауер-Бимштейн, П. В. Трушевский [и др.] // Вестник АГАТУ. 2024. № 2 (14). С. 68—91.
84. Рябухин П. Б., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Обоснование технологических процессов и систем машин для лесосечных работ // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023. № 2 (392). С. 88—105.
85. 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.
86. Интеллектуальный анализ параметров и классификация лесных и сельскохозяйственных колёсных тракторов / И. С. Должиков, П. А. Курочкин, Е. Г. Хитров [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 2 (62). С. 87—94.
87. Жуков А. В., Клоков Д. В. Показатели маневренности колёсных лесных машин // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 2: Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 1999. № 7. С. 28—33.
88. Серяков С. А., Куницкая О. А., Удальцов В. Н. Анализ моделирования механизма захвата и подачи ствола харвестерной головки // Вестник АГАТУ. 2024. № 2 (14). С. 92—103.
89. Серяков С. А., Куницкая О. А. Перспективы импульсных процессорных головок на лесозаготовках // Деревянное домостроение Севера: традиции и инновации: Сб. ст. по материалам Всерос. научно-практич. конф. Петрозаводск, 2023. С. 62—64.
90. Серяков С. А., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Безопасность и охрана труда при эксплуатации и обслуживании импульсных харвестерных головок // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2023. № 3. С. 27—37.
91. Функциональные особенности импульсных харвестерных головок / С. А. Серяков, О. А. Куницкая, А. С. Вашуткин [и др.] // Актуальные проблемы развития лесного

- комплекса: Материалы XX Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Е. А. Иванищева. Вологда, 2022. С. 332—336.
92. Оценка надёжности лесозаготовительного харвестера / А. П. Мохирев, О. А. Куницкая, Г. А. Калита [и др.] // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2022. Т. 26, № 5. С. 93—101.
93. Карпачев С. П., Быковский М. А., Лантев А. В. К вопросу выбора харвестерной головки для лесов центральной России // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2020. Т. 24, № 6. С. 113—118.
94. Куницкая О. А., Григорьев И. В. Оценка эффективности работы операторов лесных машин // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2019. С. 184—188.
95. 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.
96. Дербин В. М., Дербин М. В. Обоснование технологии заготовки древесины // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2-1 (13-1). С. 205—209.
97. Меры нефинансовой поддержки предприятий лесного комплекса по переходу на инновационные технологии / А. В. Мехренцев, А. Ф. Уразова, Ю. В. Ефимов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3 (55). С. 141—145.
98. Солдатов А. В., Коркин Е. С. Методика расчёта выхода объёма круглых лесоматериалов при раскряжёвке берёзовых и осиновых хлыстов // Леса Урала и хозяйство в них. 2006. № 27. С. 309—314.
99. Солдатов А. В., Коркин Е. С., Прешкин Г. А. Потенциальный выход сортиментов при раскряжёвке берёзовых и осиновых хлыстов с поштучной продольной подачей // Леса Урала и хозяйство в них. 2006. № 27. С. 319—323.
100. Лозовой В. А., Балдаков И. А., Миронов Г. С. Результаты структурного анализа оборудования поточных линий для раскряжёвки древесных хлыстов // Вестник КрасГАУ. 2014. № 5 (92). С. 206—208.
101. Рудов М. Е., Вернер Н. Н. Технология и машины для заготовки древесины в условиях лесосечного фонда малой концентрации // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы XVII Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Ю. М. Авдеев. Вологда, 2019. С. 221—222.
102. 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.
103. Куницкая О. А. Научное обоснование параметров систем машин на базе средств малой механизации для малообъёмного лесопользования и лесохозяйственных работ: НИР. Грант № 23-16-00092. М.: Российский научный фонд, 2023.
104. Григорьев И. В., Григорьева О. И., Чураков А. А. Эффективные технологии и системы машин для малообъёмных заготовок древесины // Энергия: экономика, техника, экология. 2018. № 2. С. 61—66.
105. Ширнин Ю. А., Пошарников Ф. В. Технология и оборудование малообъёмных лесозаготовок и лесовосстановления. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2001. 396 с.
106. Ширнин Ю. А., Рукомойников К. П., Онучин Е. М. Процессы комплексного освоения участков лесного фонда при малообъёмных лесозаготовках / Под ред. Ю. А. Ширнина. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 196 с.
107. 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.

108. 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.
109. Каляшов В. А., Григорьева О. И., Григорьев И. В. Перспективные варианты восстановления лесов на склонах // Вестник АГАТУ. 2022. № 1 (5). С. 86—96.
110. Каляшов В. А., Григорьев И. В., Григорьева О. И. Сравнительный анализ видов трелёвки на горных склонах // Вестник АГАТУ. 2022. № 2 (6). С. 41—59.
111. Григорьев И. В., Григорьева О. И. Сохранение биоразнообразия при заготовке древесины в горных лесах // Биоразнообразие. Биоконсервация. Биомониторинг: Сб. материалов II Междунар. научно-практич. конф., посвящается 75-летию Адыгейского гос. ун-та. Майкоп, 2015. С. 134—135.
112. 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.
113. Рудов С. Е. Уплотнение почвогунтов на лесосеках криолитозоны // Наука и инновации: векторы развития: Материалы Междунар. научно-практич. конф. молодых учёных: Сб. науч. ст.: В 2 кн. Барнаул, 2018. С. 103—106.
114. Рудов С. Е. Критерий разрушения почвогрунтов лесов криолитозоны под воздействием лесных машин // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2019. С. 298—303.
115. Перспективность дальнейших исследований по совершенствованию гусеничных лесных машин / Ю. А. Карасев, В. А. Марков, А. С. Дмитриев [и др.] // Resources and Technology. 2023. Т. 20, № 1. С. 42—86.
116. Forest preservation techniques in the Urals / E. F. Gerts, O. A. Kunitskaya, E. M. Runova [et al.] // International Journal of Environmental Studies. 2023. Vol. 80, no. 4. P. 1055—1064.
117. Средооадающие технологии разработки лесосек в условиях Свердловской области / Э. Ф. Герц, О. А. Куницкая, В. А. Макуев [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. 2023. № 1. С. 52—63.
118. Долгосрочные последствия воздействия движителей лесных машин на почвогрунты северных лесов / В. М. Дьяченко, В. А. Каляшов, И. С. Должиков [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2024. № 3 (15). С. 22—31.
119. Экспериментальные исследования экологической безопасности лесных машин с колёсным, гусеничным и полугусеничным движителем при работе на склонах / А. Ю. Гурьев, И. В. Григорьев, А. С. Дмитриев [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2024. № 1. С. 59—68.
120. Сравнительный анализ воздействия на почвогрунты лесных машин с различными движителями на склонах / И. В. Григорьев, А. С. Дмитриев, В. А. Каляшов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 1 (61). С. 122—129.
121. Формирование колеи движителем лесной машины на склоне оттаивающего почвогрунта криолитозоны с учётом эффекта солифлюкции / В. А. Каляшов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024. № 3 (399). С. 140—152.
122. Промежуточные итоги проекта «Теоретическое и экспериментальное обоснование систем машин для лесозаготовок и лесовосстановления на склонах в условиях криолитозоны» / О. А. Куницкая, А. Ю. Гурьев, Д. В. Новгородов [и др.] // Повышение

- эффективности лесного комплекса: Материалы Девятой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2023. С. 108—110.
123. Теоретические исследования влияния угла склона на несущую способность почвогрунта при работе лесных машин / Т. А. До, Н. И. Злобина, В. А. Каляшов [и др.] // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2022. № 2. С. 18—27.
124. Обоснование технологических параметров, связанных с тягово-сцепными свойствами гусеничной машины, работающей на склоне / Т. А. До, Н. И. Злобина, В. А. Каляшов [и др.] // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2022. № 2. С. 3—12.
125. *Каляшов В. А., Т. Ань До, Новгородов Д. В.* Правила безопасной эксплуатации лесных машин на горных склонах // *Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Восьмой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием*. Петрозаводск, 2022. С. 87—89.
126. *Каляшов В. А., Т. Ань До, Гурьев А. Ю.* Типы самоходных лебёдок для освоения лесосек на горных склонах // *Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Восьмой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием*. Петрозаводск, 2022. С. 86—87.
127. Оценка тягово-сцепных свойств движителя лесной гусеничной машины, работающей на склоне / Т. А. До, Г. В. Григорьев, В. А. Каляшов [и др.] // *Системы. Методы. Технологии*. 2022. № 2 (54). С. 78—84.

References

1. Kuznetsov A. V., Galaktionov O. N. Analysis of the production of logging machines in Russia. *Engineering Bulletin of the Don*, 2023, no. 4 (100), pp. 712—722. (In Russ.)
2. Dolzhikov I. S., Grigorev I. V. Prospects of using tractors of small traction class for import substitution in the field of forestry engineering of the Russian Federation. *Actual problems of forestry and wood processing: Materials of the All-Russian scientific and practical conference*. Ed. by Yu. M. Kazakov [et al.]. Kazan, 2023, pp. 48—51. (In Russ.)
3. Dolzhikov I. S., Dmitriev A. S., Krivosheev A. A., Mikhailova L. M. Promising approaches to the development of domestic forestry engineering. *Promising resource-saving technologies for the development of the timber industry: Materials of the International Scientific and Practical Conference of Young scientists and students*. Voronezh, 2023, pp. 62—67. (In Russ.)
4. Werner N. N. Ways to solve the problem of providing enterprises of the forest complex with high-quality and safe products of forest engineering. *Safety and labor protection in logging and woodworking industries*, 2023, no. 1, pp. 25—31. (In Russ.)
5. Shvetsova V. V. The possibilities of forestry universities in the development of domestic forestry engineering. *Innovations in the chemical and forestry complex: trends and development prospects: Materials of the All-Russian scientific and practical conference*. Ed. by Yu. A. Bezrukikh, E. V. Melnikova. Krasnoyarsk, 2022, pp. 154—157. (In Russ.)
6. Grigorev I. V. Modern problems of import substitution in forestry engineering of the Russian Federation. *Innovations in the chemical and forestry complex: trends and prospects of development: Materials of the All-Russian scientific and practical conference*. Ed. by Yu. A. Bezrukikh, E. V. Melnikova. Krasnoyarsk, 2022, pp. 165—169. (In Russ.)
7. Markov V. A., Ivanov A. M. Prospects for the use of additive technologies in forest engineering. *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 scientific research 2021: Materials of the conference reports*. Ed. by E. G. Khitrov. Saint Petersburg, 2022, pp. 277—279. (In Russ.)

8. Kuznetsov A. V. Problematics of the development of forestry engineering in Russia. *Forest exploitation and integrated use of wood: Collection of articles of the IX All-Russian Scientific and practical conference*. Krasnoyarsk, 2022, pp. 58—62. (In Russ.)
9. 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: A 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.)
10. Grigoreva O. I., Makuyev V. A., Baryshnikova E. V., Burmistrova O. N., Shvetsova V. V., Grigorev I. V., Ivanov V. A. Prospects for import substitution of machine systems for artificial reforestation. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 3 (55), pp. 78—84. (In Russ.)
11. Kurochkin P. A., Grigorev I. V., Grigoreva O. I. New approaches to the design of forestry equipment taking into account risks in the field of safety and labor protection. *Promising resource-saving technologies for the development of the timber industry: Materials of the International Scientific and Practical Conference of Young scientists and students*. Voronezh, 2023, pp. 72—77. (In Russ.)
12. Petukhov R. A. Timber industry complex of the Republic of Karelia: problems and solutions. *Prospects of science*, 2020, no. 1 (124), pp. 18—20. (In Russ.)
13. Shegelman I. R., Vasiliev A. S. On the issue of creating basic forest machines with a set of multifunctional technological equipment for economically efficient and environmentally safe development of forest resources. *Trends in the development of science and education*, 2020, no. 67-2, pp. 63—65. (In Russ.)
14. Kolotvina Yu. V., Palkin E. V. Novelties of import substitution for logging — forwarders AMKODOR. *Forest exploitation and integrated use of wood: Collection of articles of the IX All-Russian Scientific and practical conference*. Krasnoyarsk, 2022, pp. 46—50. (In Russ.)
15. Kolotvina Yu. V., Palkin E. V. Successful implementation of the import substitution program for AMKODOR machines. *Forest exploitation and integrated use of wood: Collection of articles of the IX All-Russian Scientific and practical conference*. Krasnoyarsk, 2022, pp. 50—54. (In Russ.)
16. Savinova Yu. A., Palkin E. V. AMKODOR-IT is the flagship of import substitution of Russian forestry engineering. *Forest exploitation and integrated use of wood: Collection of articles of the All-Russian scientific and practical conference*. Krasnoyarsk, 2020, pp. 169—173. (In Russ.)
17. Kalyashov V. A., Do T. A., Grigoreva O. I., Guryev A. Yu., Novogorodov D. V. Technological aspects of the safe work of forest fellers on mountain slopes. *Safety and labor protection in logging and woodworking industries*, 2022, no. 2, pp. 4—10. (In Russ.)
18. 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.)
19. Kalyashov V. A., Do T. A., Khitrov E. G., Grigoreva O. I., Guryev A. Yu., Novogorodov D. V. Modern machine systems and technologies of wood harvesting and reforestation in conditions of mountain logging sites. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 1—47. (In Russ.)
20. Kalyashov V. A., Do T. A., Novogorodov D. V. Comparison of machine systems for harvesting wood on the slopes of mountains and hills. *Forest exploitation and integrated use of wood: Collection of articles of the IX All-Russian Scientific and practical conference*. Krasnoyarsk, 2022, pp. 42—46. (In Russ.)

21. Do T. A., Grigorev G. V., Kalyashov V. A., Guryev A. Yu., Khitrov E. G. Theoretical substantiation of the permissible average pressure on the ground of the propulsion of a forest machine operating on a slope. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 2 (54), pp. 72—77. (In Russ.)
22. Shegelman I. R., Budnik P. V. Justification of the departure of the manipulator and the modes of operation of the felling-skidding processor machine. *Scientific notes of Petrozavodsk State University*, 2011, no. 4 (117), pp. 81—83. (In Russ.)
23. Budnik P. V. Justification of the maximum departure of the manipulator of the felling-skidding-processing machine for various natural production conditions. *Severgeocotech-2011: Materials of the XII International Youth Scientific Conference*: In 5 parts. Ukhta, Ukhta State Technical University, 2011, pp. 16—21. (In Russ.)
24. Shegelman I. R., Skrypnik V. I. Felling-skidding-processor machine: Patent for a utility model. Application No. 200914475422(063722). (In Russ.)
25. Baklagin V. N., Budnik P. V. Substantiation of a universal logging machine for harvesting sortings and the technological process of production of fuel chips by mobile chopping machines at a logging site. *Karelian Scientific Research Institute of the Timber industry complex of Petrozavodsk State University*. Petrozavodsk, 2008. 22 p.: ill., bibl. 4. Dept. in VINITI RAS 04.08.2008, no. 660-V2008. (In Russ.)
26. Budnik P. V., Skrypnik V. I. Substantiation of the masses and volumes of bundles of trees harvested by a felling-skidding processor machine taking into account natural production conditions and logging areas. *Actual problems of the forest complex*, 2010, no. 27, pp. 3—6. (In Russ.)
27. Shegelman I. R., Budnik P. V., Skrypnik V. I., Baklagin V. N. Method of performing logging operations with an aggregate machine. Patent for invention RU 2426303 C2, 08/20/2011. Application No. 2009109914/21 dated 03/18/2009. (In Russ.)
28. Kunitskaya O. A., Krivosheev A. A., Shvetsov A. S., Grigoreva O. I., Makuyev V. A., Revyako S. I. Technological analysis of options for using felling-skidding-processor machines. *Resources and Technology*, 2024, vol. 21, no. 2, pp. 51—82. (In Russ.)
29. Shvetsov A. S., Krivosheev A. A., Dolzhikov I. S., Grigorev I. V., Kurochkin P. A., Grigoreva O. I. Rational methods of performing logging of forest plantations with a universal logging machine. *Herald of AGATHU*, 2024, no. 1 (13), pp. 48—65. (In Russ.)
30. Shvetsov A. S., Dolzhikov I. S., Grigorev I. V., Kurochkin P. A., Grigoreva O. I. Technology of cutting down the tracks of linear objects with a universal logging machine. *Herald of AGATHU*, 2024, no. 2 (14), pp. 104—121. (In Russ.)
31. Kunitskaya O. A., Krivosheev A. A., Shvetsov A. S., Stepanishcheva M. V., Revyako S. I., Druzyanova V. P. Technological processes of continuous and selective logging using universal logging machines. *System. Methods. Technologies*, 2023, no. 4 (60), pp. 106—112. (In Russ.)
32. Kunitskaya O. A., Krivosheev A. A., Shvetsov A. S., Grigoreva O. I. Basic rules for the safe operation of universal logging machines. *Safety and labor protection in logging and wood-working industries*, 2023, no. 6, pp. 33—42. (In Russ.)
33. Kunitskaya O. A., Makuyev V. A., Storodubtseva T. N., Kalita G. A., Revyako S. I., Timokhov. S. Problems of improving the quality of domestic forestry engineering. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 4 (56), pp. 57—63. (In Russ.)
34. 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.)
35. Kunitskaya O. A., Stepanova D. I., Grigorev M. F. Promising directions for the development of transport and technological systems of the Russian forest complex. *Energy efficiency*

- and energy saving in modern production and society: Materials of the international scientific and practical conference. Under the general editorship of V. A. Gulevsky. Voronezh, 2018, pp. 109—114. (In Russ.)*
36. Odli D. B., Shegelman I. R. Analysis of the state of forestry engineering in the pre-reform economy of Karelia and the choice of promising directions for its development. *Microeconomics*, 2012, no. 1, pp. 73—75. (In Russ.)
 37. Alexandrov V. A. To the 100th anniversary of the birth of S. F. Orlov. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Academy*, 2010, no. 190, pp. 229—232. (In Russ.)
 38. Anisimov G. M., Kochnev A. M. The main directions for improving the operational efficiency of tracked skidding tractors. Saint Petersburg, Polytechnic University, 2007. 456 p. (In Russ.)
 39. Kunitskaya O. A., Petrov A. V., Krivosheev A. A., Shvetsov A. S., Dmitriev A. S., Mikhailova L. M. Analysis of the influence of natural and industrial conditions on the productivity of tractor skidding. *Herald of AGATHU*, 2023, no. 4 (12), pp. 102—149. (In Russ.)
 40. Rudov S. E., Werner N. N. Analysis of energy saturation of transport forest machines. *Transport and transport-technological systems: Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Ed. by N. S. Zakharov. Tyumen, 2016, pp. 274—278. (In Russ.)
 41. Shegelman I. R., Skrypnik V. I., Kuznetsov A. V., Vasiliev A. S. Trends in the development of modern Russian forestry engineering. *Engineering Bulletin of the Don*, 2016, no. 2 (41), p. 30. (In Russ.)
 42. Grigoreva O. I. Efficiency of transport and technological systems for forestry. *Transport and transport and technological systems: Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Ed. by N. S. Zakharov. Tyumen, 2018, pp. 79—83. (In Russ.)
 43. Goncharov A. V., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigorev M. F. The main errors of fellers leading to the failure of gasoline-powered saws. *Repair. Recovery. Modernization*, 2018, no. 10, pp. 17—21. (In Russ.)
 44. Patyakin V. I., Grigorev I. V., Redkin A. K., Ivanov V. I., Posharnikov 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*. Saint Petersburg, 2012. 362 p. (In Russ.)
 45. Kunitskaya O. A., Nikitina E. I. Ecological aspects of selective logging. *Ecological, economic and technological aspects of sustainable development of the Republic of Belarus and the Russian Federation: Collection of articles of the III International Scientific and Technical Conference «Minsk Scientific Readings 2020»: In 3 volumes*. Belarusian State Technological University, Representative Office of the Federal Agency for CIS Affairs, Compatriots Living Abroad, and International Humanitarian Cooperation (Rossotrudnichestvo) in the Republic of Belarus. Minsk, 2021, pp. 286—291. (In Russ.)
 46. Maiko I. P., Matveiko A. P., Friedrich A. P. To the use of shearing devices for power cutting. *Mechanization of logging and forest transport: Republican interdepartmental collection*. Belarusian Technological Institute named after S. M. Kirov. Minsk, 1979, pp. 9—13. (In Russ.)
 47. Nikiforova A. I., Grigoreva O. I., Kiselyov D. S., Khakhina A. M., Rudov M. E. Assessment of environmental 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.)
 48. Gryazin V. A. Energy intensity as a factor of productivity of felling and skidding machines. *Izvestia of higher educational institutions. Forest magazine*, 2009, no. 2, pp. 54—58. (In Russ.)
 49. Vysotsky M. S., Korobkin V. P., Zhukov A. V. The concept of developing machines for logging operations. *Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series 2: Forestry and woodworking industry*, 2000, no. 8, pp. 34—43. (In Russ.)

50. Kunitskaya O. A., Prosuzhikh A. A., Davtyan A. B., Grigorev M. F., Grigoreva A. I. Organizational and technical solutions for increasing the coefficient of technical readiness of forest machines. *Energy efficiency and energy conservation in modern production and society: Materials of the international scientific and practical conference*. Voronezh, 2020, pp. 162—167. (In Russ.)
51. Grigorev I. V., Tikhonov I. I., Nikiforova A. I., Grigoreva O. I. Improving the design of the felling-packing machine. *Handbook. Engineering magazine*, 2014, no. 2 (203), pp. 57—60. (In Russ.)
52. Mohirev A. P., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva 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.)
53. 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.)
54. Nikitina E. I., Kunitskaya O. A., Nikolaeva F. V. The project of the organization of logging in the conditions of the Aldan forestry with the use of multi-operational logging complexes. *Modern problems and achievements of agricultural science in the Arctic: A collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian Student Scientific and Practical conference with international participation within the framework of the Northern Forum 2020 (September 29—30, 2020, Yakutsk) and the International Online Scientific Summer School 2020 (July 6—20, 2020, Yakutsk)*. Yakutsk, 2020, pp. 138—148. (In Russ.)
55. Kunitskaya O. A., Nikitina E. I., Nikolaeva F. V. Features of logging in the Republic of Sakha Yakutia. *Land management, land management, cadastre, geodesy and cartography. Problems and prospects of development: A 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. 308—313. (In Russ.)
56. Zhukov A. V., Fedorenchik A. S., Klokov D. V. The impact of propellers of forest wheeled vehicles on the soil and their patency indicators. *Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series 2: Forestry and woodworking industry*, 1998, no. 6, pp. 11—17. (In Russ.)
57. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Davtyan A. B. Modern technological equipment of felling and harvester machines. *Repair. Recovery. Modernization*, 2020, no. 7, pp. 9—16. (In Russ.)
58. Davtyan A. B., Kunitskaya O. A., Grigorev M. F., Stepanova D. I., Grigoreva A. I. Fundamentals of increasing the efficiency of machine systems for the creation and operation of forest plantations. *Actual problems of the forest complex*, 2020, no. 56, pp. 19—22. (In Russ.)
59. Davtyan A. B., Kunitskaya O. A., Grigorev M. F., Stepanova D. I. Assessment of the effectiveness of the creation and operation of energy forest plantations. *Energy efficiency and energy conservation in modern production and society: Materials of the international scientific and practical conference*. Voronezh, 2019, pp. 61—65. (In Russ.)
60. 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.)
61. Grigorev I. V., Davtyan A. B., Grigoreva O. I. Choosing 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: A 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.)

62. Rudov S. E., Khitrov E. G., Rudov M. E., Ustinov V. V. Calculation of traction and coupling properties of a wheel skidder using data from foreign colleagues. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 1 (12), pp. 223—228. (In Russ.)
63. Matveiko A. P. Calculation of productivity of felling and felling-packing machines. *News of higher educational institutions. Forest magazine*, 1989, no. 4, pp. 36—38. (In Russ.)
64. Yudina N. Yu. Analysis of factors affecting the productivity of felling, felling-packing machines. *Mathematical modeling, computer optimization of technologies, parameters of equipment and management systems of the forest complex: Collection of scientific papers*. Ed. by V. S. Petrovsky. Voronezh, Voronezh State Forestry Academy, 1997, pp. 37—40. (In Russ.)
65. Gushchina D. A., Danilenko O. K. On the issue of improving the efficiency of the technological process of logging operations. *Actual problems of the forest complex*, 2018, no. 52, pp. 6—9. (In Russ.)
66. Danilenko O. K., Sukhoi A. N. On the variety of factors influencing the efficiency of logging production. *Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences*, 2017, vol. 2, pp. 239—244. (In Russ.)
67. Sukhanov V. S. On the development of logging technology in Russia. *Bulletin of the Moscow State University of Forestry — Lesnoy Vestnik*, 2012, no. 4, pp. 46—49. (In Russ.)
68. Alexandrov V. A. Once again about the whip technology. *Izvestia of higher educational institutions. Forest magazine*, 2013, no. 2 (332), pp. 108—114. (In Russ.)
69. Kunitskaya O. A., Tikhonov I. I., Burmistrova S. S., Grigorev I. V. Improving the efficiency of harvesting raw materials for mast-feeding plants during logging operations. *Scientific Review*, 2011, no. 4, pp. 78—83. (In Russ.)
70. Kunitskaya O. A., Tikhonov I. I., Kunitskaya D. E., Grigorev I. V., Zemtsovsky A. E. Optimization of the process of bucking whips at the timber processing bases of forest holdings when sawing raw materials for masthead mills. *News of higher educational institutions. Forest magazine*, 2014, no. 3 (339), pp. 86—93. (In Russ.)
71. Derbin V. M., Derbin M. V. Sortiment harvesting of wood during selective logging. *Izvestia of higher educational institutions. Forest magazine*, 2016, no. 5 (353), pp. 123—131. (In Russ.)
72. Derbin V. M., Derbin M. V. Harvester operation technology for selective logging. *Forestry Journal*, 2016, vol. 6, no. 2 (22), pp. 69—75. (In Russ.)
73. Ryabukhin P. B., Kunitskaya O. A., Burgonutdinov A. M., Makuev V. A., Sivtseva T. V., Zdrauskaite N. O., Gerts E. F., Markov O. B. Improving the efficiency of forest companies by optimizing the key indicators of sustainable forest management: a case study of the Far East. *Forest Science and Technology*, 2022, vol. 18, no. 4, pp. 190—200.
74. Shvetsov A. S., Seryakov S. A., Kurochkin P. A., Kunitskaya O. A. Problems of safe operation of saw chain sets of forest machines. *Occupational safety and health in logging and wood-working industries*, 2024, no. 2 (14), pp. 24—35. (In Russ.)
75. Grigorev I. V., Petrov M. E. Additional technical options for improving the safety, reliability and energy efficiency of forest machines. *Bulletin of AGATU*, 2021, no. 3 (3), pp. 73—81. (In Russ.)
76. Burmistrova O. N., Prosuzhikh A. A., Khitrov E. G., Kunitskaya O. A., Luneva E. N. Theoretical studies of forwarder productivity under restrictions of impact on soils. *News of higher educational institutions. Forest magazine*, 2021, no. 3 (381), pp. 101—116. (In Russ.)
77. Burmistrova O. N., Prosuzhikh A. A., Khitrov E. G., Rudov S. E., Kunitskaya O. A., Kalita O. N. Influence of variable coefficients of resistance to movement and adhesion on forwarder performance. *The woodworking industry*, 2021, no. 1, pp. 3—16. (In Russ.)

78. Bukhtoyarov L. D., Abramov V. V., Prosuzhikh A. A., Rudov S. E., Kunitskaya O. A., Grigorev I. V. Analysis of structures and technologies of forwarders in logging. *Resources and Technology*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 1—35. (In Russ.)
79. Pecherin V. V., Chikulaev P.S. Sortimentnaya logging in the Republic of Karelia. *Proceedings of the Faculty of Forestry Engineering of PetrSU*, 2005, no. 6, pp. 43—46. (In Russ.)
80. Zalesov S. V., Opletaev A. S., Zverev A. A. Prospects for using the sorting technology of logging. *Agrarian Russia*, 2009, no. S2, pp. 25—27. (In Russ.)
81. Matrosov A. V., Bykovsky M. A. Modeling of the work and evaluation of the effectiveness of the system of cutting machines. *Bulletin of the Moscow State University of Forestry — Lesnoy Vestnik*, 2013, no. 1, pp. 107—111. (In Russ.)
82. 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.)
83. Grigoreva O. I., Bauer-Bimstein N. A., Trushevsky P. V., Mikhailova L. M., Grigorev I. V. The practice of carrying out machine cabins of care according to Scandinavian technology in the Perm region. *Bulletin of AGATU*, 2024, no. 2 (14), pp. 68—91. (In Russ.)
84. Ryabukhin P. B., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Justification of technological processes and systems of machines for logging operations. *News of higher educational institutions. Forest magazine*, 2023, no. 2 (392), pp. 88—105. (In Russ.)
85. 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. by N. S. Zakharov. Tyumen, 2020, pp. 323—326. (In Russ.)
86. Dolzhikov I. S., Kurochkin P. A., Khitrov E. G., Dyachenko V. M., Mikhailova L. M., Grigorev I. V., Revyako S. I. Intellectual analysis of parameters and classification of forest and agricultural wheeled tractors. *System. Methods. Technologies*, 2024, no. 2 (62), pp. 87—94. (In Russ.)
87. Zhukov A. V., Klokov D. V. Indicators of maneuverability of wheeled forest vehicles. *Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series 2: Forestry and woodworking industry*, 1999, no. 7, pp. 28—33. (In Russ.)
88. Seryakov S. A., Kunitskaya O. A., Udaltsov V. N. Analysis of modeling the mechanism of capture and feeding of the barrel of the harvester head. *Bulletin of AGATU*, 2024, no. 2 (14), pp. 92—103. (In Russ.)
89. Seryakov S. A., Kunitskaya O. A. Prospects of pulse processor heads in logging. *Wooden house building in the North: traditions and innovations: Collection of articles based on the materials of the All-Russian scientific and practical conference*. Petrozavodsk, 2023, pp. 62—64. (In Russ.)
90. Seryakov S. A., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Safety and labor protection during operation and maintenance of pulsed harvester heads. *Safety and labor protection in logging and woodworking industries*, 2023, no. 3, pp. 27—37. (In Russ.)
91. Seryakov S. A., Kunitskaya O. A., Vashutkin A. S., Gorbatov A. P. Functional features of pulsed harvester heads. *Actual problems of the development of the forest complex: Materials of the XX International Scientific and Technical Conference*. The responsible editor is E. A. Ivani-sheva. Vologda, 2022, pp. 332—336. (In Russ.)
92. Mohirev A. P., Kunitskaya O. A., Kalita G. A., Werner N. N., Shvetsova V. V. Assessment of the reliability of a logging harvester. *Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 5, pp. 93—101. (In Russ.)

93. Karpachev S. P., Bykovsky M. A., Laptev A. V. On the issue of choosing a harvester head for forests of central Russia. *Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 6, pp. 113—118. (In Russ.)
94. Kunitskaya O. A., Grigorev I. V. Evaluation of the efficiency of operators of forest machines. *Transport and transport-technological systems: Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Ed. by N. S. Zakharov. Tyumen, 2019, pp. 184—188. (In Russ.)
95. 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.)
96. Derbin V. M., Derbin M. V. Substantiation of wood harve sting technology. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 2-1 (13-1), pp. 205—209. (In Russ.)
97. Mehrentsev A. V., Uraza A. F., Efimov Yu. V., Kashnikov G. V. Measures of non-financial support for enterprises of the forest complex for the transition to innovative technologies. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 3 (55), pp. 141—145. (In Russ.)
98. Soldatov A. V., Korokin E. S. Methodology for calculating the yield of round timber during bucking of birch and aspen whips. *Forests of the Urals and agriculture in them*, 2006, no. 27, pp. 309—314. (In Russ.)
99. Soldatov A. V., Korokin E. S., Preshkin G. A. Potential yield of sortings during bucking of birch and aspen whips with piece-by-piece longitudinal feeding. *Forests of the Urals and agriculture in them*, 2006, no. 27, pp. 319—323. (In Russ.)
100. Lozovoy V. A., Baldakov I. A., Mironov G. S. Results of structural analysis of production line equipment for bucking wood whips. *Bulletin of KrasGAU*, 2014, no. 5 (92), pp. 206—208. (In Russ.)
101. Rudov M. E., Werner N. N. Technology and machines for harvesting wood in conditions of a low-concentration logging fund. *Actual problems of the development of the forest complex: Materials of the XVII International Scientific and Technical Conference*. The responsible editor is Yu. M. Avdeev. Vologda, 2019, pp. 221—222. (In Russ.)
102. Grigorev I. V., Nikiforova A. I., Grigoreva O. I. Comparison of single-machine complexes for wood sorting. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 9-2 (20-2), pp. 125—128. (In Russ.)
103. Kunitskaya O. A. *Scientific substantiation of the parameters of machine systems based on small-scale mechanization for low-volume forest management and forestry work. Research and development*: Grant No. 23-16-00092. Moscow, Russian Scientific Foundation, 2023. (In Russ.)
104. Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Churakov A. A. Effective technologies and machine systems for low-volume wood blanks. *Energy: economics, technology, ecology*, 2018, no. 2, pp. 61—66. (In Russ.)
105. Shirnin Yu. A., Posharnikov F. V. *Technology and equipment of low-volume logging and reforestation*. Yoshkar-Ola, MarGTU, 2001. 396 p. (In Russ.)
106. Shirnin Yu. A., Handmoinikov K. P., Onuchin E. M. *The processes of complex development of forest fund plots in low-volume logging*. Edited by Yu. A. Shirnin. Yoshkar-Ola, MarGTU, 2005. 196 p. (In Russ.)
107. Kunitskaya O. A., Chernutsky N. A., Derbin M. V., Rudov S. E., Grigorev I. V., Grigoreva O. I. *Machine harvesting of wood using Scandinavian technology*. Saint Petersburg, Publishing and Printing Association of Higher Educational institutions, 2019. 192 p. (In Russ.)

108. 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.)
109. Kalyashov V. A., Grigoreva O. I., Grigorev I. V. Promising options for forest restoration on slopes. *Bulletin of AGATU*, 2022, no. 1 (5), pp. 86—96. (In Russ.)
110. Kalyashov V. A., Grigorev I. V., Grigoreva O. I. Comparative analysis of types of skidding on mountain slopes. *Herald of AGATHU*, 2022, no. 2 (6), pp. 41—59. (In Russ.)
111. Grigorev I. V., Grigoreva O. I. Conservation of biodiversity during timber harvesting in mountain forests. *Biodiversity. Bioconservation. Biomonitoring: The collection of materials of the II International Scientific and Practical Conference, dedicated to the 75th anniversary of the Adygea State University*. Maykop, 2015, pp. 134—135. (In Russ.)
112. Nikiforova A. I., Grigoreva O. I. Modeling of the impact of forest machinery movers on the soils of logging 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.)
113. Rudov S. E. Compaction of soil mounds in the logging areas of the cryolithozone. *Science and innovation: vectors of development. Materials of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists: Collection of scientific articles: In 2 books*. Barnaul, 2018, pp. 103—106. (In Russ.)
114. Rudov S. E. Criterion of destruction of soils of forests of the cryolithozone under the influence of forest machines. *Transport and transport-technological systems: Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Ed. by N. S. Zakharov. Tyumen, 2019, pp. 298—303. (In Russ.)
115. Karasev Yu. A., Markov V. A., Dmitriev A. S., Dolzhikov I. S., Yudilevich A. M. Prospects for further research on the improvement of tracked forest machines. *Resources and Technology*, 2023, vol. 20, no. 1, pp. 42—86. (In Russ.)
116. Gerts E. F., Kunitskaya O. A., Runova E. M., Tikhonov E. A., Timokhov R. S., Mikhaylenko E., Chemshikova Ju., Perfiliev P. N. Forest conservation techniques in the Urals. *International Journal of Environmental Studies*, 2023, vol. 80, no. 4, pp. 1055—1064.
117. Hertz E. F., Kunitskaya O. A., Makuyev V. A., Dmitriev A. S., Tikhonov E. A., Grigoreva O. I. Environmental technologies for the development of cutting areas in the Sverdlovsk region. *The woodworking industry*, 2023, no. 1, pp. 52—63. (In Russ.)
118. Dyachenko V. M., Kalyashov V. A., Dolzhikov I. S., Dmitriev A. S., Guryev A. Yu., Novgorodov D. V., Novikov M. S. Long-term effects of the impact of forest machinery movers on the soils of northern forests. *Safety and labor protection in logging and woodworking industries*, 2024, no. 3 (15), pp. 22—31. (In Russ.)
119. Guryev A. Yu., Grigorev I. V., Dmitriev A. S., Kalyashov V. A., Dolzhikov I. S., Dyachenko V. M. Experimental studies of environmental safety of forest machines with wheeled, tracked and semi-tracked propulsion when working on slopes. *Occupational safety and health in logging and woodworking industries*, 2024, no. 1, pp. 59—68. (In Russ.)
120. Grigorev I. V., Dmitriev A. S., Kalyashov V. A., Dolzhikov I. S., Krivosheev A. A., Shvetsov A. S., Grigoreva O. I. Comparative analysis of the impact on soils of forest machines with various propellers on slopes. *System. Methods. Technologies*, 2024, no. 1 (61), pp. 122—129. (In Russ.)
121. Kalyashov V. A., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Dolzhikov I. S., Druzyanova V. P. Formation of a track by a forest machine mover on the slope of a thawing cryolithozone soil, taking into account the solifluction effect. *News of higher educational institutions. Forest Journal*, 2024, no. 3 (399), pp. 140—152. (In Russ.)

122. Kunitskaya O. A., Guryev A. Yu., Novgorodov D. V., Novikov M. S., Kalyashov V. A. Interim results of the project «Theoretical and experimental substantiation of machine systems for logging and reforestation on slopes in a cryolithozone». *Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the Ninth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2023, pp. 108—110. (In Russ.)
123. Do T. A., Zlobina N. I., Kalyashov V. A., Guryev A. Yu., Grigoreva O. I., Khitrov E. G. Theoretical studies of the influence of slope angle on the bearing capacity of soil during the operation of forest machines. *The woodworking industry*, 2022, no. 2, pp. 18—27. (In Russ.)
124. Do T. A., Zlobina N. I., Kalyashov V. A., Novgorodov D. V., Grigoreva O. I., Khitrov E. G. Substantiation of technological parameters related to the traction properties of a tracked vehicle operating on a slope. *The woodworking industry*, 2022, no. 2, pp. 3—12. (In Russ.)
125. Kalyashov V. A., Do T. A., Novgorodov D. V. Rules for the safe operation of forest machines on mountain slopes. *Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the Eighth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2022, pp. 87—89. (In Russ.)
126. Kalyashov V. A., Do T. A., Guryev A. Yu. Types of self-propelled winches for the development of logging areas on mountain slopes. *Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the Eighth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2022, pp. 86—87. (In Russ.)
127. Do T. A., Grigorev G. V., Kalyashov V. A., Novgorodov D. V., Grigoreva O. I., Khitrov E. G. Evaluation of traction properties of the propulsion of a forest tracked vehicle operating on a slope. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 2 (54), pp. 78—84. (In Russ.)

© Кривошеев А. А., Швецов А. С., Бурмистрова О. Н., Григорьев И. В.,
Ревяко С. И., Охлопкова М. К., 2024

DOI: 10.15393/j2.art.2024.8163

УДК 630*378.33

Статья

Планирование поставки лесоматериалов потребителям по транспортно-технологической схеме плот (линейка) — плот

Васильев Владимир Викторович

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

Афоничев Дмитрий Николаевич

*доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I (Российская Федерация),
dmafonichev@yandex.ru*

Получена: 11 ноября 2024 / Принята: 28 ноября 2024 / Опубликовано: 2 декабря 2024

Аннотация: Практическая реализация транспортно-технологической схемы, функционирующей по принципу плот (линейка) — плот, на базе усовершенствованной плоской сплottedной единицы требует планирования поставки лесоматериалов потребителям. Для качественного планирования сплава лесоматериалов возникает необходимость обоснования габаритных размеров плоской сплottedной единицы и плотов различного назначения, в конструкцию которых заложена данная сплottedная единица. Предложена методика расчёта габаритных размеров плоской сплottedной единицы, плота (линейки) для первоначального сплава древесины и плота для магистрального сплава древесины. При обосновании габаритов данной сплottedной единицы и плотов различного назначения выполняется расчёт их фактической длины, ширины, высоты, первоначальной осадки и объёма содержания древесины. На основании предложенной методики было выполнено планирование поставки лесоматериалов потребителям с учётом использования оптимального периода первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации и рациональной расстановки буксирных судов, задействованных на буксировке плотов. При объёме плота (линейки) $171,26 \text{ м}^3$, когда годовой объём оборота древесины на береговом складе составляет $9,0 \text{ тыс. м}^3$, а оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов равен 160 дней, применяется

одно буксирное судно, имеющее срок оборачиваемости три дня. Если годовой объём оборота древесины на береговом складе равен 20,0 тыс. м³, а оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов составляет 120 дней, то используются два буксирных судна, имеющих срок оборачиваемости два дня, при условии, что объём плота (линейки) составляет 171,26 м³. В том случае, когда годовой объём оборота древесины на береговом складе равен 30,0 тыс. м³, а оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов составляет 180 дней, следует привлекать три буксирных судна со сроком оборачиваемости три дня, если объём плота (линейки) составляет 171,26 м³. На магистральном плотовом сплаве лесоматериалов при среднем объёме древесины в плоту 3425,27 м³ необходимо использовать один буксировщик и, в зависимости от транспортных условий, вспомогательные буксирные суда или специальные средства управления плотами.

Ключевые слова: буксирное судно; лесоматериалы; плоская сплоточная единица; первоначальная осадка; коэффициент полнодревесности

DOI: 10.15393/j2.art.2024.8163

Article

Planning timber delivery to consumers according to the transport and technological scheme of raft (section lines) — raft

Vladimir Vasiliev

Ph. D. in engineering, associate professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great (Russian Federation), vasiliev.vladimir87@mail.ru

Dmitry Afonichev

D. Sc. in engineering, professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great (Russian Federation), dmafonichev@yandex.ru

Received: 11 November 2024 / Accepted: 28 November 2024 / Published: 2 December 2024

Abstract: The practical implementation of a transport and technological scheme operating on the raft section lines — raft principle on the basis of an improved flat — flow unit requires planning the delivery of timber to consumers. For high-quality planning of timber rafting, it becomes necessary to justify the overall dimensions of a flat raft unit and rafts for various purposes, the design of which is based on this raft unit. A method to calculate the overall dimensions of a flat raft unit, a raft (section lines) for the initial wood floating and a raft for the main wood floating is proposed. When justifying the dimensions of this raft unit and rafts for various purposes, their actual length, width, height, initial draft and volume of wood content are calculated. Based on the proposed methodology, planning timber delivery to consumers was performed taking into account time-optimal span of the initial timber raft floating during one navigation and the rational arrangement of towboats. Provided the volume of the raft (section line) is 171.26 m³ with the annual wood turnover in the onshore warehouse of 9.0 thousand m³ and the time-optimal span of the initial raft of timber floating of 160 days, then one towboat is used with the turnover time of three days. If the annual wood turnover in the onshore warehouse is 20.0 thousand m³ and the time-optimal span for the initial timber raft floating is 120 days, then two towboats with a turnover period of two days are used, provided that the volume of the raft (section line) is 171.26 m³. In the event that the annual turnover of wood in the onshore warehouse is 30.0 thousand m³, and the time-optimal span for the initial timber raft floating is 180 days, then three towboats with a turnover period of three days should be used if the volume of the raft (section line) is 171.26 m³. On the main raft timber floating with an average volume of

wood in a raft of 3425.27 m³, it is necessary to use one towboat and, depending on the transport conditions, auxiliary towboats or special raft control tools.

Keywords: towboat; timber; flat raft unit; initial draft; coefficient of raft-section density

1. Введение

Заготавливаемые лесоматериалы в эксплуатационных лесах, достигших экономического и технического возраста спелости, имеют наибольшую ценность [1—6], а следовательно, своевременно должны транспортироваться от мест заготовок к пунктам потребления с использованием экономически выгодного вида транспорта. В условиях Российской Федерации данные лесоматериалы могут транспортироваться по водным путям, например, сплавом в сплоточных единицах и плотах.

Сплав лесоматериалов реализуется по транспортно-технологическим схемам, представленным в работах [7—11]. Каждая из этих схем учитывает особенности всех видов водного транспорта древесины [7—16], но они не принимают в расчёт развивающееся направление сплава лесоматериалов в современных плоских сплоточных единицах, что не позволяет использовать распространённые транспортно-технологические схемы при планировании сплава лесоматериалов в плоских сплоточных единицах. Для устранения выявленных проблем разработана транспортно-технологическая схема, функционирующая на базе плоских сплоточных единиц по принципу плот (линейка) — плот [17], [18]. Для практической реализации разработанная схема требует выполнения определённого комплекса мероприятий, а именно предварительных работ, связанных с подготовкой к сплаву древесины, основных и заключительных работ [19], [20]. Изначально должны осуществляться подготовительные работы, которые заключаются в анализе водных путей, разработке и подписании соответствующих документов для проведения сплавных работ, а также в планировании сплава древесины. Особое внимание следует уделить планированию сплава древесины, которое должно учитывать конструктивные особенности используемых плоских сплоточных единиц, линеек, сформированных из них, и плотов, образованных из линеек, применяемых на первоначальном сплаве лесоматериалов.

Для реализации предложенной транспортно-технологической схемы усовершенствована конструкция плоской сплоточной единицы [21—23] и создан плот на её основе [24], [25]. Плоская сплоточная единица и плот предназначены для выполнения как первоначального плотового сплава лесоматериалов, так и магистрального. Несмотря на это, на сегодняшний день оценить рентабельность применения разработанной транспортно-технологической схемы, функционирующей на базе усовершенствованной плоской сплоточной единицы и плота на её основе, невозможно, т. к. отсутствует методика планирования сплава лесоматериалов для транспортно-технологической схемы, функционирующей по принципу плот (линейка) — плот.

Цель работы — разработать методику планирования поставки лесоматериалов потребителям по транспортно-технологической схеме плот (линейка) — плот, функционирующей на базе усовершенствованной плоской сплоточной единицы и плота на её основе.

2. Материалы и методы

Планирование поставки лесоматериалов водным транспортом в усовершенствованной плоской сплочной единице [21—23] по разработанной транспортно-технологической схеме, функционирующей по принципу плот (линейка) — плот, требует, во-первых, обоснования оптимальных параметров береговых складов, переформировочных рейдов, пункта (отстойника) для кратковременной или длительной передержки плотов, плотостоянок, рейда приплава [19], [20], а во-вторых, установления габаритных размеров усовершенствованной плоской сплочной единицы, первоначальных и магистральных плотов, формирующихся из данной сплочной единицы [19], [20]. В данном случае обоснование оптимальных параметров береговых складов, переформировочных рейдов, пункта (отстойника) для кратковременной или длительной передержки плотов, плотостоянок, рейда приплава будет осуществляться на основании ряда факторов, одним из которых является максимальный годовой навигационный объём оборота древесины через них, который зависит от объёма сплава древесины в плоских сплочных единицах и плотях на их основе. При этом формирование объёма сплава лесоматериалов в усовершенствованной сплочной единице, а также в первоначальных и магистральных плотях осуществляется за счёт габаритных размеров эксплуатируемых водных объектов и годового объёма заготовки древесины на лесосеках, т. е. габаритные размеры сплавного хода определяют параметры используемых транспортных единиц, а следовательно, и содержание в них определённого объёма древесины. Отсюда следует, что необходимо первоначально проработать методику расчёта габаритных размеров плотов (линеек) для первоначального плотового сплава и плотов для магистрального плотового сплава с учётом особенностей формирования габаритов усовершенствованной сплочной единицы.

Обоснование габаритных размеров плотов (линеек) для первоначального и магистрального плотового сплава лесоматериалов реализуется в три этапа. Первый этап — обоснование габаритных размеров усовершенствованной плоской сплочной единицы с учётом габаритных размеров сплавного хода. Второй этап — обоснование габаритных размеров плота (линейки), сформированного из усовершенствованной плоской сплочной единицы, предназначенной для первоначального плотового сплава. Третий этап — обоснование габаритных размеров плота, предназначенного для магистрального плотового сплава.

При расчёте габаритных размеров плотов (линеек) для первоначального и магистрального плотового сплава лесоматериалов используются следующие входные данные: $b_{\min.LX}$ — минимальная ширина сплавного хода на первоначальном плотовом сплаве древесины, м; B_{PLCE} — проектная максимальная ширина плоской сплочной единицы, м; $r_{ПДП}$ — процентное содержание в плоской сплочной единице древесины повышенной плавучести; $r_{ПДП}$ — процентное содержание в плоской сплочной единице древесины ограниченной плавучести; $h_{\min.LX}$ — минимальная глубина сплавного хода, м;

ρ_B — плотность воды, кг/м³; ρ_{III} — плотность древесины повышенной плавучести, кг/м³; ρ_{OII} — плотность древесины ограниченной плавучести, кг/м³; d_{135BO} — диаметр круглых лесоматериалов в верхнем отрезе, уложенных в первом (нижнем), третьем, пятом и т. д. рядах, см; S_{135C} — средняя сбежистость круглых лесоматериалов, уложенных в первом (нижнем), третьем, пятом и т. д. рядах, см/м; d_{246BO} — диаметр круглых лесоматериалов в верхнем отрезе, уложенных во втором, четвертом, шестом и т. д. рядах, см; S_{246C} — средняя сбежистость круглых лесоматериалов, уложенных во втором, четвертом, шестом и т. д. рядах, см/м; $K_{ПЦЕ}$ — коэффициент полндревесности плоской сплottedной единицы; g — ускорение свободного падения, м/с²; m_{CT} — масса сплottedного такелажа (скобы), кг; $z_{III C}$ — число проволоки в гибкой связи; π — число «пи», постоянное, приблизительно равное 3,14; σ_{Pnpd} — предельно допускаемое напряжение при растяжении, Па; $\rho_{III C}$ — плотность материала проволоки гибкой связи, кг/м³; $\rho_{ГС}$ — плотность материала гибкой связи, кг/м³; $r_{\min.LX}$ — минимальный радиус поворота сплавного хода на первоначальном плотовом сплаве древесины, м; $b_{\min.LXM}$ — минимальная ширина сплавного хода на магистральном плотовом сплаве древесины, м; B_{BC} — ширина встречного каравана, м; $r_{\min.LXM}$ — минимальный радиус поворота сплавного хода на магистральном плотовом сплаве древесины, м; i_{III} — установленный интервал между линейками (секциями) в магистральном плоту, м.

2.1. Обоснование габаритов усовершенствованной плоской сплottedной единицы

При обосновании габаритов усовершенствованной плоской сплottedной единицы акцент ставится на определение её фактической длины, ширины, высоты, первоначальной осадки и объёма содержания древесины. Также интерес представляет определение общего количества круглых лесоматериалов, находящихся в одной плоской сплottedной единице.

Фактическая длина плоской сплottedной единицы $L_{ПЦЕ}$ (м) зависит от длины круглых лесоматериалов $L_{135КЛ}$ (м), уложенных в первом (нижнем), третьем, пятом и т. д. рядах, т. е.

$$L_{ПЦЕ} = L_{135КЛ} \cdot \quad (1)$$

Фактическая ширина плоской сплottedной единицы напрямую зависит от проектной максимальной ширины сплottedной единицы и диаметра круглых лесоматериалов в верхнем отрезе, укладываемых в первый (нижний) ряд. На основании сказанного диаметр круглых лесоматериалов в нижнем отрезе d_{135HO} (м), которые укладываются в первом (нижнем), третьем, пятом и т. д. рядах, рассчитывается следующим образом:

$$d_{135HO} = \frac{d_{135BO}}{100} + L_{135КЛ} \frac{S_{135C}}{100}. \quad (2)$$

Средний диаметр круглого лесоматериала, уложенного в первом (нижнем), третьем, пятом и т. д. рядах, равен:

$$d_{135HCp} = \frac{d_{135BO} + d_{135HO}}{2}. \quad (3)$$

Количество круглых лесоматериалов, укладываемых в каждом ряду — первом (нижнем), третьем, пятом и т. д., составит:

$$n_{135} = \frac{B_{PICE}}{d_{135HCp}}. \quad (4)$$

Показатель, рассчитанный по формуле (4), округляется до целого значения в меньшую сторону и принимается как рекомендуемое количество укладки круглых лесоматериалов в каждом соответствующем ряду плоской сплочной единицы. При этом проектная максимальная ширина плоской сплочной единицы должна удовлетворять условию

$$B_{PICE} \leq \frac{b_{\min.LX}}{k_{P.LX}}, \quad (5)$$

где $k_{P.LX}$ — коэффициент учёта радиуса поворота сплавного хода.

В формуле (5) коэффициент $k_{P.LX}$ изменяется в диапазоне 1,5...2,0. Нижний порог принимается на реках, характеризующихся большим радиусом поворота сплавного хода и прямолинейностью транспортного пути, верхний порог применяется на реках, имеющих малый радиус поворота сплавного хода [8], [9].

Учитывая равенства (4) и (5), определяем фактическую ширину плоской сплочной единицы, которая составит:

$$B_{PICE} = d_{135HCp} n_{135}. \quad (6)$$

Фактическая высота плоской сплочной единицы зависит от плотности древесины повышенной и ограниченной плавучести, диаметра круглых лесоматериалов в верхнем отрезе, а также от проектной осадки данной сплочной единицы. Максимально допустимая проектная осадка плоской сплочной единицы равна:

$$T_{PICE} = h_{\min.LX} - Z_D, \quad (7)$$

где Z_D — донный запас, равный 0,2...0,3 м [8], [9], [16].

Доля содержания в плоской сплочной единице древесины повышенной и ограниченной плавучести рассчитывается соответственно по формулам

$$R_{III} = \frac{r_{III}}{100}; \quad (8)$$

$$R_{OII} = \frac{r_{OII}}{100}. \quad (9)$$

Проектную высоту плоской сплочной единицы H_{PICE} (м), с учётом рекомендаций работы [26], следует определять по формуле

$$H_{\text{ПИСЕ}} = \frac{T_{\text{ПИСЕ}} \rho_B}{\rho_{\text{ПШ}} R_{\text{ПШ}} + \rho_{\text{ОП}} R_{\text{ОП}}}. \quad (10)$$

Длина круглых лесоматериалов, укладываемых во втором, четвёртом, шестом и т. д. рядах, будет равна фактической ширине плоской сплочной единицы, т. е. $L_{246\text{КЛ}} = B_{\text{ПИСЕ}}$.

Диаметр круглых лесоматериалов в нижнем отрезе $d_{246\text{НО}}$ (м), которые укладываются во втором, четвёртом, шестом рядах и т. д., рассчитывается по формуле

$$d_{246\text{НО}} = \frac{d_{246\text{ВО}}}{100} + L_{246\text{КЛ}} \frac{S_{246\text{С}}}{100}. \quad (11)$$

Средний диаметр круглого лесоматериала, уложенного во втором, четвёртом, шестом рядах и т. д., рассчитывается следующим образом:

$$d_{246\text{Ср}} = \frac{d_{246\text{ВО}} + d_{246\text{НО}}}{2}. \quad (12)$$

Количество круглых лесоматериалов, укладываемых в каждом ряду (втором, четвёртом, шестом и т. д.), составит:

$$n_{246} = \frac{L_{\text{ПИСЕ}}}{d_{246\text{Ср}}}. \quad (13)$$

Значение, полученное расчётным путём по формуле (13), округляется до целого в меньшую сторону и принимается как рекомендуемое количество укладки круглых лесоматериалов в каждом соответствующем ряду плоской сплочной единицы.

Максимально возможное количество укладки рядов круглых лесоматериалов в плоской сплочной единице равно:

$$n_{\text{ПИСЕ}} = \frac{2H_{\text{ПИСЕ}}}{(d_{135\text{НО}} + d_{246\text{НО}})}. \quad (14)$$

Расчётное значение, полученное из формулы (14), округляется до целого значения в меньшую сторону, т. к. высота плоской сплочной единицы регламентируется глубиной сплавного хода.

Фактическая высота плоской сплочной единицы рассчитывается в зависимости от полученного округлённого значения $n_{\text{ПИСЕ}}$. Если полученное значение $n_{\text{ПИСЕ}}$ нечётное, то фактическая высота рассчитывается по формуле

$$H_{\text{ПИСЕ}} = d_{135\text{НО}} \left(\frac{n_{\text{ПИСЕ}}}{2} + 0,5 \right) + d_{246\text{НО}} \left(\frac{n_{\text{ПИСЕ}}}{2} - 0,5 \right). \quad (15)$$

В случае, когда значение $n_{\text{ПИСЕ}}$ чётное, фактическую высоту плоской сплочной единицы следует определять по выражению

$$H_{\text{ФПСЕ}} = d_{135\text{НО}} \frac{n_{\text{РПСЕ}}}{2} + d_{246\text{НО}} \frac{n_{\text{РПСЕ}}}{2}. \quad (16)$$

Количество нечётных рядов — первый (нижний), третий, пятый и т. д., находящихся в плоской сплочной единице, определяется согласно полученному расчётному значению $n_{\text{РПСЕ}}$. В случае, когда $n_{\text{РПСЕ}}$ нечётное, количество нечётных рядов определяется по формуле

$$n_{\text{Р135}} = \frac{n_{\text{РПСЕ}}}{2} + 0,5. \quad (17)$$

Если расчётный параметр $n_{\text{РПСЕ}}$ чётный, то количество нечётных рядов — первый (нижний), третий, пятый и т. д., находящихся в плоской сплочной единице, будет равно:

$$n_{\text{Р135}} = \frac{n_{\text{РПСЕ}}}{2}. \quad (18)$$

В практических условиях количество чётных рядов (второй, четвёртый, шестой и т. д.), находящихся в плоской сплочной единице, зависит от расчётного показателя $n_{\text{РПСЕ}}$. При условии, что $n_{\text{РПСЕ}}$ нечётное, количество чётных рядов равно:

$$n_{\text{Р246}} = \frac{n_{\text{РПСЕ}}}{2} - 0,5. \quad (19)$$

В свою очередь, когда $n_{\text{РПСЕ}}$ чётное, количество чётных рядов (второй, четвёртый, шестой и т. д.), находящихся в плоской сплочной единице, составит:

$$n_{\text{Р246}} = \frac{n_{\text{РПСЕ}}}{2}. \quad (20)$$

Общее количество круглых лесоматериалов длиной $L_{135\text{КЛ}}$ (м), находящихся во всех нечётных рядах — первый (нижний), третий, пятый и т. д. плоской сплочной единицы, определяется по формуле

$$n_{\text{ОЛ135}} = n_{\text{Р135}} n_{135}. \quad (21)$$

При этом общее количество круглых лесоматериалов длиной $L_{246\text{КЛ}}$ (м), размещённых во всех чётных рядах (второй, четвёртый, шестой и т. д.) плоской сплочной единицы, следует рассчитывать по формуле

$$n_{\text{ОЛ246}} = n_{\text{Р246}} n_{246}. \quad (22)$$

Общий объём содержания древесины в плоской сплочной единице зависит от её геометрического объёма и коэффициента полндревесности.

Геометрический объём плоской сплочной единицы рассчитывается по формуле

$$V_{\text{ГПСЕ}} = H_{\text{ФПСЕ}} B_{\text{ФПСЕ}} L_{\text{ФПСЕ}}. \quad (23)$$

На основании геометрического объёма плоской сплочной единицы рассчитывается содержание в ней древесины:

$$V_{ДПСЕ} = V_{ГПСЕ} K_{ПСЕ}. \quad (24)$$

Первоначальная осадка плоской сплочной единицы формируется на основании объёма содержания в ней древесины с различной плотностью, массы сплочного такелажа, коэффициента полнодревесности, а также с учётом фактической длины и ширины сплочной единицы.

Вес плоской сплочной единицы рассчитывается по формуле

$$G_{ПСЕ} = g(V_{ДПСЕ} \rho_{ПП} R_{ПП} + V_{ДПСЕ} \rho_{ОП} R_{ОП} + m_{СТ}). \quad (25)$$

Гибкие связи плоской сплочной единицы могут представлять собой трос единой структуры, т. е. трос из одной проволоки, или из нескольких проволок, т. е. проволочной скрутки, а значит, расчёт необходимого диаметра гибкой связи должен выполняться с учётом общего количества проволоки, содержащейся в ней. На основании вышесказанного, используя при этом ключевые условия прочности материала [27—33] и основные формулы расчёта диаметра гибких связей [23], получим зависимость для расчёта диаметра одной проволоки, находящейся в гибкой связи, выполненной в виде проволочной скрутки. Данная формула имеет следующий вид:

$$d_{\min ПГС} = \sqrt{\frac{2[k_{ЗПП}] k_{ПГС} G_{ПСЕ}}{\pi z_{ПГС} \sigma_{Прод}}}. \quad (26)$$

где $[k_{ЗПП}]$ — коэффициент запаса прочности при растяжении; $k_{ПГС}$ — понижающий коэффициент для гибкой связи.

Коэффициент запаса прочности $[k_{ЗПП}]$ для проволоки следует принимать 3 [23], [34]. Понижающий коэффициент $k_{ПГС}$ для гибкой связи данной плоской сплочной единицы устанавливается 1,5...2,0.

Расстояние между первым (нижним) и последним нечётным рядом h_{135} (м) зависит от общего количества рядов в плоской сплочной единице $n_{ПСЕ}$. Если $n_{ПСЕ}$ чётное значение, то h_{135} (м) рассчитывается следующим образом:

$$h_{135} = \frac{n_{ПСЕ}}{2} d_{135НО} + \left(\frac{n_{ПСЕ}}{2} - 1 \right) d_{246НО}. \quad (27)$$

При условии, когда $n_{ПСЕ}$ нечётное, расстояние между первым (нижним) и последним нечётным рядом необходимо рассчитывать по формуле

$$h_{135} = \left(\frac{n_{ПСЕ}}{2} + 0,5 \right) d_{135НО} + \left(\frac{n_{ПСЕ}}{2} - 0,5 \right) d_{246НО}. \quad (28)$$

Длина одной проволоки, входящей в состав гибкой связи, соединяющей между собой первый (нижний), третий, пятый и т. д. ряды, равна:

$$L_{П135} = (2B_{ФПСЕ} + 2h_{135})1,1. \quad (29)$$

Расстояние между вторым и последним чётным рядом h_{246} (м) зависит от показателя $n_{РПСЕ}$. Когда $n_{РПСЕ}$ чётное значение, формула для расчёта h_{246} (м) имеет вид:

$$h_{246} = \left(\frac{n_{РПСЕ}}{2} - 1 \right) d_{135НО} + \frac{n_{РПСЕ}}{2} d_{246НО}. \quad (30)$$

В том случае, если $n_{РПСЕ}$ нечётное, то расстояние между вторым и последним чётным рядом определяется из выражения

$$h_{135} = \left(\frac{n_{РПСЕ}}{2} - 1,5 \right) d_{135НО} + \left(\frac{n_{РПСЕ}}{2} - 0,5 \right) d_{246НО}. \quad (31)$$

Длина одной проволоки, входящей в состав гибкой связи, соединяющей между собой второй, четвёртый, шестой ряды и т. д., равна:

$$L_{П246} = (2L_{ФПСЕ} + 2h_{246})1,1. \quad (32)$$

Объём материала гибких связей, состоящих из определённого количества проволоки и соединяющих между собой первый (нижний), третий, пятый ряды и т. д., рассчитывается по формуле

$$V_{П135} = 2z_{ПГС} \left(\frac{\pi d_{\min ПГС}^2 L_{П135}}{4} \right). \quad (33)$$

В свою очередь, объём материала гибких связей, состоящих из определённого количества проволоки и соединяющих между собой второй, четвёртый, шестой ряды и т. д., будет равен:

$$V_{П246} = 2z_{ПГС} \left(\frac{\pi d_{\min ПГС}^2 L_{П246}}{4} \right). \quad (34)$$

Общая масса гибких связей, с учётом формул (33) и (34), определится из выражения

$$m_{ПГС} = \rho_{ПГС} (V_{П135} + V_{П246}). \quad (35)$$

Первоначальная осадка усовершенствованной плоской сплочной единицы, с учётом того, что гибкая связь представляет собой проволочную скрутку, будет рассчитываться по формуле

$$T_{ФПСЕ} = \frac{V_{ДПСЕ} \rho_{ПП} R_{ПП} + V_{ДПСЕ} \rho_{ОП} R_{ОП} + m_{СТ} + m_{ПГС}}{B_{ФПСЕ} L_{ФПСЕ} \rho_{В} K_{ПСЕ}}. \quad (36)$$

В практических условиях, когда гибкие связи плоской сплочной единицы представляют собой трос единой структуры, т. е. трос из одной проволоки, с учётом ключевых условий прочности материала [27—33] и основных формул расчёта диаметра гибких связей [23],

получим зависимость для определения минимального диаметра гибкой связи, которая имеет следующий вид:

$$d_{\min GC} = \sqrt{\frac{2[k_{3PP}]k_{ПГС}G_{ПСЕ}}{\pi\sigma_{Pnpd}}}. \quad (37)$$

На основании формул (27), (28) и (29), с учётом зависимости (33), объём материала гибких связей, состоящих из троса в виде одной проволоки, т. е. троса единой структуры, которые соединяют между собой первый (нижний), третий, пятый ряды и т. д., будет рассчитываться по следующей зависимости:

$$V_{GC135} = 2 \left(\frac{\pi d_{\min GC}^2 L_{П135}}{4} \right). \quad (38)$$

Учитывая формулы (30), (31), (32), при этом преобразовав равенство (34), получили зависимость для расчёта объёма материала гибких связей, представляющих трос, состоящий из одной проволоки, которые соединяют между собой второй, четвёртый, шестой ряды и т. д. Данная зависимость имеет вид:

$$V_{GC246} = 2 \left(\frac{\pi d_{\min GC}^2 L_{П246}}{4} \right). \quad (39)$$

Используя равенства (38) и (39), определяем общую массу гибких связей, представляющих собой трос в виде одной проволоки:

$$m_{GC} = \rho_{GC} (V_{GC135} + V_{GC246}). \quad (40)$$

Первоначальная осадка усовершенствованной плоской сплottedной единицы, с учётом того, что гибкая связь представляет собой трос в виде одной проволоки, будет рассчитываться по формуле

$$T_{FPCE} = \frac{V_{ДПСЕ}\rho_{ПП}R_{ПП} + V_{ДПСЕ}\rho_{ОП}R_{ОП} + m_{СТ} + m_{GC}}{B_{FPCE}L_{FPCE}\rho_B K_{ПСЕ}}. \quad (41)$$

Представленная методика обоснования габаритов усовершенствованной плоской сплottedной единицы учитывает все её конструктивные особенности, а отдельные элементы данной методики будут использоваться в дальнейшем для расчёта габаритов плотов различного назначения.

2.2. Обоснование габаритов плота (линейки) для первоначального сплава древесины

Обоснование габаритов плота (линейки) заключается в установлении его фактической ширины, высоты, длины, первоначальной осадки, а также в расчёте объёма содержания древесины в плоту (линейке), его коэффициента полндревесности и количественного показателя плоских сплottedных единиц в одном плоту (линейке).

Проектная ширина плота (линейки), используемого на первоначальном плотовом сплаве древесины по малым и средним рекам, когда преимущественно присутствует одностороннее движение, рассчитывается по формуле

$$B_{PPL} = \frac{b_{\min.LX}}{k_{PLX}}. \quad (42)$$

Максимальное количество устанавливаемых плоских сплочных единиц по ширине линейки рассчитывается следующим образом:

$$n_{\PhiШПСЕ} = \frac{B_{PPL}}{B_{FPCE}}. \quad (43)$$

Полученный результат $n_{\PhiШПСЕ}$ округляется до целого числа в меньшую сторону, т. к. количество устанавливаемых сплочных единиц по ширине линейки регламентируется шириной сплавного хода.

На основании зависимости (43) фактическая ширина плота (линейки) будет равна:

$$B_{FPPL} = B_{FPCE} n_{\PhiШПСЕ}. \quad (44)$$

Так как плот (линейка) формируется из усовершенствованной плоской сплочной единицы, то справедливо считать, что проектная высота плота (линейки) H_{PPL} (м) будет равна проектной высоте плоской сплочной единицы H_{FPCE} (м), т. е. $H_{PPL} = H_{FPCE}$. Отсюда следует, что фактическая высота плота (линейки) H_{FPPL} (м) будет равна фактической высоте плоской сплочной единицы H_{FPCE} (м), а значит, справедливо равенство $H_{FPPL} = H_{FPCE}$. В свою очередь, проектная осадка плота (линейки) T_{PPL} (м) соответствует проектной осадке плоской сплочной единицы T_{FPCE} (м). На основании сказанного можно записать следующие равенства:

$$T_{FPPL} = T_{FPCE}; \quad (45)$$

$$T_{FPPL} = T_{FPCE}. \quad (46)$$

Фактическая длина плота (линейки) зависит от проектной длины линейки, т. е. от максимально допустимой длины плота (линейки), где проектная длина линейки учитывает габариты используемых плоских сплочных единиц и габариты сплавного хода. Таким образом, проектная длина плота (линейки), при условии, что его буксировка будет реализовываться по малым и средним рекам, характеризующимся лимитирующими габаритами сплавного хода, рекомендуется определять следующим образом [10]:

$$L_{PPL} = \sqrt{0,0025r_{\min.LX} + 4,4r_{\min.LX}b_{\min.LX} + 7,78b_{\min.LX}^2 + 3,42\frac{b_{\min.LX}^3}{r_{\min.LX}}}. \quad (47)$$

Угол поворота одной плоской сплottedной единицы составит [35]:

$$\beta_{ПСЕ} = 2 \arctan \frac{L_{ФПСЕ}}{2r_{\min ЛХ} - B_{ФПЛ}}. \quad (48)$$

Максимальное количество круговой установки плоских сплottedных единиц в плоту (линейке) зависит от угла поворота одной сплottedной единицы, рассчитанного по формуле (48). Следовательно, максимальное количество круговой установки плоских сплottedных единиц в линейке можно определить по формуле [35]:

$$n_{ПЛПСЕ} = \frac{360}{\beta_{ПСЕ}}. \quad (49)$$

Полученное по формуле (49) расчётное значение округляется в меньшую сторону, т. к. количество установки плоских сплottedных единиц регламентируется длиной окружности с радиусом $r_{\min ЛХ}$.

Так как установка в плоту плоских сплottedных единиц должна осуществляться с интервалами между ними, то сумма интервалов, согласно работе [35], определяется следующим образом:

$$\sum i_{ПСЕ} = 2\pi B_{ФПЛ}. \quad (50)$$

При этом интервал между двумя плоскими сплottedными единицами составит:

$$i_{ПСЕ} = \frac{\sum i_{ПСЕ}}{n_{ПЛПСЕ}}. \quad (51)$$

На основании формул (47) и (51) максимальное количество установки плоских сплottedных единиц по длине плота (линейки) будет равно:

$$n_{ФДПСЕ} = \frac{L_{ФПЛ}}{L_{ФПСЕ} + i_{ПСЕ}}. \quad (52)$$

Полученное значение $n_{ФДПСЕ}$ округляется до целого в меньшую сторону, т. к. максимальное количество устанавливаемых плоских сплottedных единиц по длине плота (линейки) ограничивается проектной длиной линейки.

Учитывая равенства (51) и (52), запишем конечную формулу для расчёта фактической длины плота (линейки):

$$L_{ФПЛ} = L_{ФПСЕ} n_{ФДПСЕ} + (n_{ФДПСЕ} - 1) i_{ПСЕ}. \quad (53)$$

Общее количество сплottedных единиц, содержащихся в одном плоте (линейке), рассчитывается следующим образом:

$$n_{ФПЛПСЕ} = n_{ФДПСЕ} n_{ФШПСЕ}. \quad (54)$$

Расчётное содержание определённого объёма древесины в одном плоту (линейке), с учётом формул (24) и (54), составит:

$$V_{ДПЛ} = V_{ДПСЕ} n_{ФППСЕ}. \quad (55)$$

В соответствии с полученными данными о расчётном содержании древесины в одном плоту (линейке) и о его фактических габаритах рассчитывается коэффициент полндревесности:

$$K_{ПЛ} = \frac{V_{ДПЛ}}{B_{ФПЛ} H_{ФПЛ} L_{ФПЛ}}. \quad (56)$$

Приведённая методика обоснования габаритов плота (линейки) на базе усовершенствованной плоской сплоточной единицы необходима для планирования транспортировки древесины на первоначальном плотовом сплаве. При этом расчётные показатели линейки (плота) будут использоваться в дальнейшем для планирования транспортировки древесины в магистральных плотах.

2.3. Обоснование габаритов плота для магистрального сплава древесины

Проектное обоснование габаритов плота, который предназначен для магистрального плотового сплава древесины, направлено на определение следующих фактических транспортно-эксплуатационных показателей плота: ширина; высота; длина; количество линеек в плоту; расчётный объём древесины; коэффициент полндревесности.

Для магистрального плота расчёт максимально допустимой ширины, т. е. проектной ширины, следует выполнять по формуле [8—11]

$$B_{РП} = \frac{b_{\min.ЛХМ} - B_{ВС}}{2,6}. \quad (57)$$

Максимальное количество установки плотов (линеек) по ширине магистрального плота определяется следующим образом:

$$n_{ФШПЛ} = \frac{B_{РП}}{B_{ФПЛ}}. \quad (58)$$

Расчётный показатель $n_{ФШПЛ}$ округляется до целого числа в меньшую сторону, т. к. количество устанавливаемых плотов (линеек) по ширине магистрального плота регламентируется шириной сплавного хода на больших и крупных реках.

На основании формул (44) и (58) фактическая ширина плота будет рассчитываться по формуле

$$B_{ФП} = B_{ФПЛ} n_{ФШПЛ}. \quad (59)$$

Проектная высота и фактическая высота плота будут соответствовать проектной высоте и фактической высоте плота (линейки), предназначенного для первоначального плотового сплава древесины. В данном случае справедливо записать следующие равенства:

$$H_{PI} = H_{PIL}. \quad (60)$$

$$H_{FI} = H_{FIL}. \quad (61)$$

Фактическая длина магистрального плота зависит от многих факторов, и при этом рассчитывается от проектной длины данного плота. Таким образом, изначально устанавливается проектная длина плота, а затем рассчитывается фактическая длина плота в зависимости от максимально возможного количества установки в плоту линейек, которые использовались на первоначальном плотовом сплаве древесины.

Проектная длина плота, с учётом зависимости (47), рассчитывается по формуле [10]

$$L_{PI} = \sqrt{0,0025r_{\min JXM} + 4,4r_{\min JXM}b_{\min JXM} + 7,78b_{\min JXM}^2 + 3,42\frac{b_{\min JXM}^3}{r_{\min JXM}}}. \quad (62)$$

Максимально возможное количество установки плотов (линеек), используемых на первоначальном плотовом сплаве древесины, по длине магистрального плота будет равно:

$$n_{\Phi PIL} = \frac{L_{PI}}{L_{FIL} + i_{PI}}. \quad (63)$$

Расчётный показатель $n_{\Phi PIL}$ округляется до целого в меньшую сторону, т. к. максимальное количество устанавливаемых плотов (линеек), используемых на первоначальном сплаве древесины, по длине магистрального плота ограничивается проектной длиной указанного плота.

На основании равенства (63), с учётом зависимости (53), запишем формулу расчёта фактической длины плота:

$$L_{FI} = L_{FIL}n_{\Phi PIL} + (n_{\Phi PIL} - 1)i_{PI}. \quad (64)$$

Общее количество плотов (линеек), используемых на первоначальном плотовом сплаве древесины, которые содержатся в магистральном плоту, рассчитывается по формуле

$$n_{FPIL} = n_{\Phi PIL}n_{\Phi PPL}. \quad (65)$$

Общий объём древесины, который содержится в одном магистральном плоту, определяется на основании расчётного содержания объёма древесины в одном плоту (линейке) V_{DPI} (м³) и общего количества плотов (линеек), содержащихся в магистральном плоту, n_{FPIL} . На основании сказанного общий объём древесины, который содержится в одном магистральном плоту, равен:

$$V_{DI} = V_{DPI}n_{FPIL}. \quad (66)$$

Коэффициент полндревесности магистрального плота рассчитывается с учётом его габаритов, определяемых по формулам (59), (61), (64), и фактического содержания в нём древесины $V_{ДП}$ (м^3), т. е. формула расчёта коэффициента полндревесности плота имеет следующий вид:

$$K_{II} = \frac{V_{ДП}}{B_{ФП} H_{ФП} L_{ФП}}. \quad (67)$$

3. Результаты

Планирование поставки лесоматериалов потребителям в усовершенствованной плоской сплottedной единице и плоте на её основе по транспортно-технологической схеме плот (линейка) — плот осуществляется для следующих условий: $b_{\min.ЛХ} = 10,0$ м; $b_{\min.ЛХМ} = 50,0$ м; $B_{BC} = 10,0$ м; $r_{\min.ЛХ} = 90,0$ м; $r_{\min.ЛХМ} = 500,0$ м; $\rho_{ПГС} = \rho_{ГС} = 7800$ кг/ м^3 ; $\sigma_{Pnpd} = 5 \cdot 10^8$ Па; $z_{ПГС} = 15$; $\rho_B = 1000$ кг/ м^3 ; $g = 9,8$ м/ с^2 ; $K_{ПСЕ} = 0,70$; $r_{ПДП} = r_{ПДОП} = 50$ %; $\rho_{ПД} = \rho_{ОП} = 750$ кг/ м^3 ; $d_{135BO} = d_{246BO} = 20$ см; $S_{135C} = S_{246C} = 1,0$ см; $B_{ПСЕ} = 3,0$ м; $h_{\min.ЛХ} = 1,4$ м; $L_{135КЛ} = 6,0$ м; $Z_D = 0,3$; $k_{PЛХ} = 2,0$.

По приведённой выше методике, с учётом публикаций [23], [36], изначально был выполнен расчёт транспортно-эксплуатационных показателей усовершенствованной плоской сплottedной единицы, плота (линейки), предназначенного для первоначального плотового сплава древесины, а также плота, сформированного из плотов (линеек), используемых на первоначальном сплаве. В результате этого были получены следующие ключевые показатели: $m_{CT} = 50,0$ кг; $V_{ДПСЕ} = 15,5694$ м^3 ; $T_{ФППСЕ} = 0,9547$ м; $i_{ПД} = 0,2042$ м; $V_{ДПД} = 171,2634$ м^3 ; $K_{ПД} = 0,679$; $V_{ДП} = 3425,268$ м^3 ; $K_{II} = 0,6435$. Представленные расчёты демонстрируют, какой объём древесины будет транспортироваться тягой одного буксирного судна на первоначальном и магистральном плотовом сплаве лесоматериалов.

На основании полученных данных расчёта транспортно-эксплуатационных показателей транспортных единиц определили фактический объём древесины, который можно транспортировать за одну навигацию. При условии, что оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации составляет, например, 150 дней, где на данном виде сплава лесоматериалов задействован один буксировщик, а период его оборачиваемости составляет три дня, то за указанный период будет отбуксировано 50 плотов (линеек), сформированных из усовершенствованной плоской сплottedной единицы. Следовательно, общий объём сплава древесины на первоначальном плотовом сплаве составит: $V_D = 171,2634 \times 50 = 8563,17$ м^3 . На магистральном плотовом сплаве древесины, при условии, что на переформировочный рейд поступают плоты (линейки) только с одного берегового склада, общий объём сплава лесоматериалов будет равен объёму первоначального плотового сплава. Таким образом, максимальный объём поставки лесоматериалов потребителям в усовершенствованной плоской сплottedной

единице по транспортно-технологической схеме плот (линейка) — плот за одну навигацию составит 8563,17 м³.

Подробно рассматривая расчёт максимального объёма поставки лесоматериалов потребителям за одну навигацию, можно сделать вывод, что на данный показатель влияют факторы, связанные со свойствами и параметрами сплавляемых круглых лесоматериалов, с условиями проведения сплавных работ, транспортно-эксплуатационными показателями усовершенствованной плоской сплоточной единицы, оптимальным периодом первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации, периодом оборачиваемости буксирного судна и количеством применяемых буксировщиков. При этом на оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации, как правило, влияют габариты сплавного хода, продолжительность навигации и количество атмосферных осадков. Период оборачиваемости буксирного судна зависит от расстояния первоначального плотового сплава древесины. Количество применяемых буксировщиков обусловлено транспортными условиями и материальными ресурсами сплавных предприятий.

Для увеличения объёма поставки лесоматериалов потребителям в плоских сплоточных единицах по транспортно-технологической схеме плот (линейка) — плот необходимо увеличить объём первоначального плотового сплава древесины, что достигается не только разработкой плоских сплоточных единиц с высокими транспортно-эксплуатационными показателями [21], но и подготовкой лесоматериалов и сплавных путей к выполнению сплава древесины, использованием оптимального периода первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации и рациональной расстановкой буксирных судов, задействованных на буксировке плотов (линеек).

В практических условиях не всегда есть возможность должным образом подготовить лесоматериалы и транспортные пути к сплаву древесины, а именно изменить свойства и параметры лесоматериалов и расширить габариты сплавного пути. Тогда возникает необходимость в рациональном использовании оптимального периода первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации и рентабельной расстановки буксирных судов. Причём оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации для каждого года имеет различные показатели, а расстановка буксирных судов обуславливается периодом их оборачиваемости и количеством задействованных буксировщиков на одном транспортном пути.

Для дальнейшего анализа влияния рационального использования оптимального периода первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации и рентабельной расстановки буксирных судов устанавливаем, что на первоначальном плотовом сплаве лесоматериалов задействован один буксировщик. При этом на переформировочный рейд плоты (линейки) доставляются с одного берегового склада, т. е. плотовой сплав лесоматериалов производится по одному транспортному пути. Следовательно, объёмы первоначального и магистрального плотового сплава

лесоматериалов равны. Также обуславливаемся, что навигационный период составляет 200 дней и уменьшается с шагом 10 дней до 100 дней, а период оборачиваемости буксирного судна составляет один день и увеличивается с шагом в одни сутки до 10 дней. Все результаты расчёта для одного транспортного пути представлены в таблице 1.

Приведённые расчётные данные в таблице 1 показывают, что с увеличением периода оборачиваемости буксирного судна и уменьшением оптимального периода первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации объём поставки лесоматериалов потребителям уменьшается.

Таблица 1. Объём поставки лесоматериалов потребителям при использовании одного буксирного судна, тыс. м³

Table 1. The volume of timber delivery to consumers using one towboat, thousand m³

Наименование		Период оборачиваемости буксирного судна, дней									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации, дней	200	34,25	17,13	11,30	8,56	6,85	5,65	4,80	4,28	3,77	3,43
	190	32,54	16,27	10,79	8,05	6,51	5,31	4,62	3,94	3,60	3,25
	180	30,83	15,41	10,28	7,71	6,17	5,14	4,28	3,77	3,43	3,08
	170	29,11	14,56	9,59	7,19	5,82	4,80	4,11	3,60	3,08	2,91
	160	27,40	13,70	9,13	6,85	5,48	4,45	3,77	3,43	2,91	2,74
	150	25,69	12,84	8,56	6,34	5,14	4,28	3,60	3,08	2,74	2,57
	140	23,98	11,99	7,99	5,99	4,80	3,94	3,43	2,91	2,57	2,40
	130	22,26	11,13	7,36	5,48	4,45	3,60	3,08	2,74	2,40	2,23
	120	20,55	10,28	6,85	5,14	4,11	3,43	2,91	2,57	2,23	2,06
	110	18,84	9,41	6,17	4,62	3,77	3,08	2,57	2,23	2,06	1,88
	100	17,13	8,56	5,65	4,28	3,43	2,74	2,40	2,06	1,88	1,71

Учитывая приведённые расчётные данные в таблице 1 и первоначальные установленные условия ($b_{\min.LX} = 10,0$ м; $b_{\min.LXM} = 50,0$ м; $B_{BC} = 10,0$ м; $r_{\min.LX} = 90,0$ м; $r_{\min.LXM} = 500,0$ м; $\rho_{ПГС} = \rho_{ГС} = 7800$ кг/м³; $\sigma_{Pnpd} = 5 \cdot 10^8$ Па; $z_{ПГС} = 15$; $\rho_B = 1000$ кг/м³; $g = 9,8$ м/с²; $K_{ПСЕ} = 0,70$; $r_{ПДП} = r_{ПДОП} = 50$ %; $\rho_{П} = \rho_{ОП} = 750$ кг/м³; $d_{135BO} = d_{246BO} = 20$ см; $S_{135C} = S_{246C} = 1,0$ см; $B_{PПCE} = 3,0$ м; $h_{\min.LX} = 1,4$ м; $L_{135KL} = 6,0$ м; $Z_D = 0,3$; $k_{PLX} = 2,0$), выполним планирование поставки лесоматериалов потребителям в усовершенствованной плоской сплоточной единице по транспортно-технологической схеме плот (линейка) — плот для одного транспортного пути с использованием одного буксирного судна на первоначальном плотовом сплаве древесины. Например, при годовом обороте древесины на береговом складе, равном 9,0 тыс. м³, где оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации оставляет 160 дней, необходимо обеспечить

период оборачиваемости буксирного судна трёхдневным сроком. Таким образом, для заданных условий за 160 дней навигации для буксировки 9,0 тыс. м³ лесоматериалов на первоначальном плотовом сплаве древесины следует применять одно буксирное судно, имеющее срок оборачиваемости три дня, которое должно отбуксировать 53 плота (линейки) с объёмом древесины $V_{ДПЛ} = 171,26 \text{ м}^3$ от берегового склада до формировочного рейда. В свою очередь, при магистральном плотовом сплаве древесины, который может быть реализован на протяжении всей навигации, необходимо отбуксировать три плота с формировочного рейда на рейды приплава. Для буксировки трёх плотов, имеющих средний объём древесины $V_{ДП} = 3425,27 \text{ м}^3$, должны быть задействованы один буксировщик и, в зависимости от транспортных условий, вспомогательные буксирные суда или специальные средства управления плотами.

Период оборачиваемости буксирного судна не всегда можно варьировать, например, он может регламентироваться транспортными условиями, работой переформировочного рейда, а также нормируемым рабочим днём. Таким образом, период оборачиваемости буксировщика устанавливается для конкретного транспортного пути на постоянной основе. При этом может варьироваться количество задействованных буксировщиков на одном транспортном пути. На основании сказанного, для дальнейшего анализа влияния рационального использования оптимального периода первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации и рентабельной расстановки буксирных судов, устанавливаем, что на первоначальном плотовом сплаве лесоматериалов в первом случае период оборачиваемости буксирного судна составляет два дня, а во втором случае — три дня. Для двух случаев на переформировочный рейд плоты (линейки) доставляются с одного берегового склада, т. е. плотовой сплав лесоматериалов производится по одному транспортному пути, а значит, объёмы первоначального и магистрального плотового сплава лесоматериалов равны. Обуславливаемся, что навигационный период составляет 200 дней и уменьшается с шагом 10 дней до 100 дней, а количество буксирных судов равно одному и увеличивается с шагом в одно судно до шести единиц. Результаты расчёта для одного транспортного пути при периоде оборачиваемости буксирного судна в два и три дня соответственно указаны в таблицах 2 и 3.

Анализируя расчётные данные, представленные в таблицах 2 и 3, можно сделать вывод, что независимо от периода оборота буксирного судна при увеличении количества буксировщиков, задействованных на первоначальном плотовом сплаве древесины, объём поставки лесоматериалов потребителям увеличивается.

Для периода оборачиваемости буксирного судна в два дня на первоначальном плотовом сплаве древесины, с учётом первоначальных установленных условий ($b_{\min.ЛХ} = 10,0 \text{ м}$; $b_{\min.ЛХМ} = 50,0 \text{ м}$; $B_{BC} = 10,0 \text{ м}$; $r_{\min.ЛХ} = 90,0 \text{ м}$; $r_{\min.ЛХМ} = 500,0 \text{ м}$; $\rho_{ПГС} = \rho_{ГС} = 7800 \text{ кг/м}^3$; $\sigma_{Ппрд} = 5 \cdot 10^8 \text{ Па}$; $z_{ПГС} = 15$; $\rho_B = 1000 \text{ кг/м}^3$; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$; $K_{ПСЕ} = 0,70$;

$r_{\text{ПДП}} = r_{\text{ПДОП}} = 50\%$; $\rho_{\text{ПП}} = \rho_{\text{ОП}} = 750 \text{ кг/м}^3$; $d_{135\text{ВО}} = d_{246\text{ВО}} = 20 \text{ см}$; $S_{135\text{С}} = S_{246\text{С}} = 1,0 \text{ см}$; $B_{\text{РПСЕ}} = 3,0 \text{ м}$; $h_{\text{min,ЛХ}} = 1,4 \text{ м}$; $L_{135\text{КЛ}} = 6,0 \text{ м}$; $Z_{\text{Д}} = 0,3$; $k_{\text{РЛХ}} = 2,0$), выполним планирование

Таблица 2. Объём поставки лесоматериалов потребителям при периоде оборачиваемости буксирного судна в два дня, тыс. м³

Table 2. The volume of timber delivery to consumers with a two-day turnover period of a towboat, thousand m³

Наименование		Количество задействованных буксирных судов, шт.					
		1	2	3	4	5	6
Оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации, дней	200	17,13	34,25	51,38	68,51	85,63	102,76
	190	16,27	32,54	48,81	65,08	81,35	97,62
	180	15,41	30,83	46,24	61,65	77,07	92,48
	170	14,56	29,11	43,67	58,23	72,79	87,34
	160	13,70	27,40	41,10	54,80	68,51	82,21
	150	12,84	25,69	38,53	51,38	64,22	77,07
	140	11,99	23,98	35,97	47,95	59,94	71,93
	130	11,13	22,26	33,40	44,53	55,66	66,79
	120	10,28	20,55	30,84	41,10	51,38	61,65
	110	9,41	18,84	28,26	37,68	47,10	56,52
	100	8,56	17,13	25,69	34,25	42,82	51,38

Таблица 3. Объём поставки лесоматериалов потребителям при периоде оборачиваемости буксирного судна в три дня, тыс. м³

Table 3. Volume of timber delivery to consumers with a towboat turnover period of three days, thousand m³

Наименование		Количество задействованных буксирных судов, шт.					
		1	2	3	4	5	6
Оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации, дней	200	11,30	22,61	33,91	45,21	56,52	67,82
	190	10,79	21,58	32,54	43,16	53,95	64,74
	180	10,28	20,55	30,83	41,10	51,38	61,65
	170	9,59	19,18	29,11	38,36	47,95	57,54
	160	9,13	18,15	27,40	36,31	45,38	54,46
	150	8,56	17,13	25,69	34,25	42,82	51,38
	140	7,99	15,76	23,98	31,51	39,39	47,27
	130	7,36	14,73	22,26	29,46	36,82	44,19
	120	6,85	13,70	20,55	27,40	34,25	41,10
	110	6,17	12,33	18,84	24,66	30,83	36,99
	100	5,65	11,30	17,13	22,61	28,26	33,91

поставки лесоматериалов потребителям в усовершенствованной плоской сплочной единице по транспортно-технологической схеме плот (линейка) — плот для одного транспортного пути. Устанавливаем, что годовой оборот древесины на береговом складе равен 20,0 тыс. м³, где оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации оставляет 120 дней, где на основании таблицы 2 необходимо задействовать на буксировку плотов (линеек) два буксирных судна. Таким образом, при заданных условиях за 120 дней навигации для буксировки 20,0 тыс. м³ лесоматериалов на первоначальном плотовом сплаве древесины следует применять два буксирных судна, имеющих срок оборачиваемости два дня. В совокупности два буксирных судна обязаны отбуксировать 117 плотов (линеек) с берегового склада на переформировочный рейд, где объём древесины в каждом плоту составляет 171,26 м³. При этом на магистральном плотовом сплаве древесины, который может быть реализован на протяжении всей навигации, следует отбуксировать шесть плотов. Для буксировки шести плотов с формировочного рейда на рейды приплава, которые имеют средний объём древесины $V_{ДП} = 3425,27 \text{ м}^3$, должны быть задействованы один буксировщик и, в зависимости от транспортных условий, вспомогательные буксирные суда или специальные средства управления плотами.

В свою очередь, для периода оборачиваемости буксирного судна в три дня на первоначальном плотовом сплаве древесины, с учётом первоначальных установленных условий ($b_{\min.LX} = 10,0 \text{ м}$; $b_{\min.LXM} = 50,0 \text{ м}$; $B_{BC} = 10,0 \text{ м}$; $r_{\min.LX} = 90,0 \text{ м}$; $r_{\min.LXM} = 500,0 \text{ м}$; $\rho_{ПГС} = \rho_{ГС} = 7800 \text{ кг/м}^3$; $\sigma_{Ппрд} = 5 \cdot 10^8 \text{ Па}$; $z_{ПГС} = 15$; $\rho_B = 1000 \text{ кг/м}^3$; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$; $K_{ПСЕ} = 0,70$; $r_{ПДП} = r_{ПДОП} = 50 \%$; $\rho_{ПШ} = \rho_{ОП} = 750 \text{ кг/м}^3$; $d_{135BO} = d_{246BO} = 20 \text{ см}$; $S_{135C} = S_{246C} = 1,0 \text{ см}$; $B_{ППСЕ} = 3,0 \text{ м}$; $h_{\min.LX} = 1,4 \text{ м}$; $L_{135КЛ} = 6,0 \text{ м}$; $Z_D = 0,3$; $k_{ПЛХ} = 2,0$), выполним планирование поставки лесоматериалов потребителям в усовершенствованной плоской сплочной единице по транспортно-технологической схеме плот (линейка) — плот для одного транспортного пути. Для дальнейшего планирования принимаем: годовой оборот древесины на береговом складе равен 30,0 тыс. м³, где оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации оставляет 180 дней. Согласно таблице 3, необходимо задействовать на буксировку плотов (линеек) три буксирных судна. При заданных условиях за 180 дней навигации для буксировки 30,0 тыс. м³ лесоматериалов на первоначальном плотовом сплаве древесины следует применять три буксирных судна, имеющих срок оборачиваемости три дня. Отсюда следует, что три буксирных судна обязаны отбуксировать 176 плотов (линеек) с объёмом древесины $V_{ДП} = 171,26 \text{ м}^3$ с берегового склада на переформировочный рейд. Причём на магистральном плотовом сплаве древесины, который может быть реализован на протяжении всей навигации, следует отбуксировать девять плотов. Для буксировки девяти плотов с формировочного рейда на рейды приплава, которые имеют средний объём древесины $V_{ДП} = 3425,27 \text{ м}^3$, должны быть задействованы один буксировщик и, в зависимости от транспортных условий, вспомогательные буксирные суда или специальные средства управления плотами.

4. Обсуждение и заключение

Организация поставки лесоматериалов потребителям по транспортно-технологической схеме, функционирующей по принципу плота (линейка) — плот, требует не только разработки новых конструкций линеек и плотов, изготавливаемых на базе плоской сплочной единицы, но и планирование поставки лесоматериалов для данной транспортно-технологической схемы. При планировании поставки лесоматериалов особое внимание необходимо уделять обоснованию габаритных размеров усовершенствованной плоской сплочной единицы, а также расчёту габаритов плотов, формирующихся из данной сплочной единицы.

В концепцию обоснования габаритов плоской сплочной единицы и плотов различного назначения заложен расчёт их фактической длины, ширины, высоты, первоначальной осадки, максимального объёма содержания древесины, коэффициента полндревесности и количественного показателя транспортных единиц, находящихся в одном плоту. Весь процесс обоснования габаритных размеров плоской сплочной единицы и плотов на её основе строится с учётом установленных габаритов сплавного хода, первоначальной плотности сплавляемой древесины, диаметра круглых лесоматериалов, укладываемых в ряды сплочной единицы, и других показателей.

Выполнено предметное планирование поставки лесоматериалов потребителям в усовершенствованной плоской сплочной единице по транспортно-технологической схеме, функционирующей по принципу плота (линейка) — плот. При планировании поставки лесоматериалов потребителям учитывались не только габариты сплавного хода, геометрические параметры и физические свойства сплавляемых лесоматериалов, но и максимальное использование оптимального периода первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации и рациональная расстановка буксирных судов, задействованных на буксировке плотов (линеек).

При объёме плота (линейки) $171,26 \text{ м}^3$, когда годовой объём оборота древесины на береговом складе составляет $9,0 \text{ тыс. м}^3$, а оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов равен 160 дням, применяется одно буксирное судно, имеющее срок оборачиваемости три дня. Если годовой объём оборота древесины на береговом складе равен $20,0 \text{ тыс. м}^3$, а оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов — 120 дням, то используются два буксирных судна, имеющие срок оборачиваемости два дня, при условии, что объём плота (линейки) составляет $171,26 \text{ м}^3$. В том случае, когда годовой объём оборота древесины на береговом складе равен $30,0 \text{ тыс. м}^3$, а оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов составляет 180 дней, следует привлекать три буксирных судна со сроком оборачиваемости три дня, если объём плота (линейки) составляет $171,26 \text{ м}^3$. На магистральном плотовом сплаве лесоматериалов при среднем объёме древесины в плоту $3425,27 \text{ м}^3$ необходимо

использовать один буксировщик и, в зависимости от транспортных условий, вспомогательные буксирные суда или специальные средства управления плотами.

Установлено, что для увеличения объёма сплава лесоматериалов на первоначальном плотовом сплаве древесины, а следовательно, и на магистральном плотовом сплаве следует эффективно использовать оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов с привлечением достаточного количества буксирных судов с минимальным периодом их оборачиваемости.

Список литературы

1. Сухих В. И. Лесоустройство: Учебник. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2014. 400 с.
2. Лесоустройство / О. А. Неволин [и др.]. Архангельск: Правда Севера, 2003. 583 с.
3. Grossberg S. P. Forest management. Nova Science Publishers, 2009. 329 p.
4. Staaf K. A. G., Wiksten N. A. Tree harvesting techniques. Springer Netherlands, 1984. 359 p.
5. Continuous cover forestry: assessment, analysis, scenarios / S. Magnussen [et al.]. Springer Netherlands, 2002. 348 p.
6. The sustainable forestry handbook / S. Higman, J. Mayers, S. Bass [et al.]. VIVA BOOKS PVT.LTD, 2004. 350 p.
7. Васильев В. В. Анализ распространённых транспортно-технологических схем водного транспорта лесоматериалов // Научный журнал молодых учёных ФГБОУ ВО «Орловский ГАУ». 2019. № 4 (17). С. 48—52.
8. Справочник по водному транспорту леса / Под общ. ред. В. А. Щербакова. М.: Лесн. пром-сть, 1986. 384 с.
9. Пятакин В. И., Дмитриев Ю. Я., Зайцев А. А. Водный транспорт леса: Учебник для вузов. М.: Лесн. пром-сть, 1985. 336 с.
10. Лебедев Н. И., Поминова Г. И. Водный транспорт леса. Изд. 2-е, перераб. М.: Лесн. пром-сть, 1974. 304 с.
11. Водный транспорт леса: Справочник / Е. Н. Гаврилова [и др.]. М.: Гослесбумиздат, 1963. 560 с.
12. Perfiliev P., Zadrauskaite N., Rybak G. Study of hydrodynamic resistance of a raft composed of the flat rafting units of various draft // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18 (1.5). Austria, 2018. P. 765—772.
13. Brevet 2882723 FR, Int. Cl.8 B63B 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 03.03.2005; la date de parution 21.10.2005, bulletin 06/36. 14 p.
14. Васильев В. В., Афоничев Д. Н. Усовершенствованные системы плотового сплава лесоматериалов. Saarbrucken (Германия): Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 284 с.
15. Patent 5119529 USA, Int. Cl.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.
16. Васильев В. В., Афоничев Д. Н. Использование плоских сплочных единиц на первоначальном сплаве лесоматериалов // Известия вузов. Лесной журнал. 2022. № 1. С. 128—142. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-128-142.

17. *Васильев В. В.* Обоснование параметров транспортно-технологической схемы поставки древесины в плоских сплочных единицах по принципу плот (линейка) — плот // *Resources and Technology*. 2021. Т. 18, № 2. С. 48—78. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5603.
18. *Васильев В. В.* Усовершенствованная транспортно-технологическая схема поставки древесины водным транспортом в плоских сплочных единицах по принципу плот (линейка) — плот // *Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм: Материалы междунар. научно-практич. онлайн-конф.; г. Воронеж, 17—19 нояб. 2020 г.* Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», 2020. С. 341—346.
19. *Васильев В. В.* Планирование сплава древесины в плоских сплочных единицах // *Инновационные технологии и технические средства для АПК: Материалы междунар. научно-практич. конф. молодых учёных и специалистов; Воронеж, 11—12 нояб. 2021 г.* Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ», 2021. С. 214—216.
20. *Васильев В. В.* Организация плотового сплава древесины на базе плоских сплочных единиц // *Современные ресурсосберегающие технологии и технические средства лесного комплекса: Материалы Всерос. научно-практич. конф., Воронеж, 25—26 нояб. 2021 г.* Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2021. С. 7—10. URL: <https://vgltu.ru/nauka/konferencii-/2021/srsts/>. Текст: электронный.
21. Патент № 210485 Р. Ф., МПК В63В 35/62. Плоская сплочная 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). № 2021125409; заявл. 19.10.2020; опубл. 18.04.2022, Бюл. № 11. 5 с.
22. *Васильев В. В., Афоничев Д. Н.* Требования к диаметрам круглых лесоматериалов для обеспечения жёсткости плоской сплочной единицы // *Resources and Technology*. 2024. Т. 21, № 3. С. 39—56. DOI: 10.15393/j2.art.2024.7483.
23. *Васильев В. В.* Расчёт транспортно-эксплуатационных показателей усовершенствованной плоской сплочной единицы // *Resources and Technology*. 2022. Т. 19, № 4. С. 1—22. DOI: 10.15393/j2.art.2022.6365.
24. Патент № 2811178 Р.Ф., МПК В63В 35/62. Плот / 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). № 2023121796; заявл. 21.08.2023; опубл. 11.01.2024, Бюл. № 2. 9 с.
25. *Васильев В. В.* Модернизированный плот на базе современной плоской сплочной единицы // *Актуальные проблемы энергетики АПК в современной реальности: Материалы междунар. научно-практич. конф., посвящённой основателю факультета энергетики и электрификации Валентину Васильевичу Фокину; г. Ижевск, 15 мая 2024 г.* Ижевск: ФГБОУ ВО «Удмуртский ГАУ», 2024. С. 90—95. URL: <https://udsau.ru/news/-novosti/17699-aktualnye-problemy-energetiki-apk-v-sovremennoj-realnosti.html>. Текст: электронный.
26. *Лебедев А. Н.* Водный транспорт леса. Л.: Гослестехиздат, 1939. 464 с.
27. *Belyayev N. M.* Problems in strength of materials. Elsevier, 1966. 539 p.
28. *Stephens R. C.* Strength of materials. Theory and examples. Edward Arnold, 1970. 314 p.
29. *Patnaik S., Hopkins D.* Strength of aterials: a new unified theory for the 21st century. Butterworth; Heinemann (Elsevier), 2004. 771 p.

30. Boresi A. P., Schmidt R. J., Sidebottom O. M. *Advanced mechanics of materials*. Wiley, 1993. 827 p.
31. Broutman L. *Interfaces in composites*. ASTM, 1968. 198 p.
32. Skalmierski B. *Mechanics and strength of materials*. Academic Press, Elsevier, 1979. 435 p.
33. Komarovskiy A. A., Astakhov V. P. *Physics of strength and fracture control: adaptation of engineering materials and structures*. CRC Press, 2002. 629 p.
34. Донской И. П. *Водный транспорт леса*. М.: Гослесбумиздат, 1955. 332 с.
35. 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.
36. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022660776. Программа для планирования сплава древесины в плотках на базе плоских сплоточных единиц / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, В. А. Морковин, Е. В. Поздняков; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова» (RU). Заявл. 08.06.2022, зарегистрировано 08.06.2022.

References

1. Sukhikh V. I. *Forest inventory: Textbook*. Yoshkar-Ola, PSTU, 2014. 400 p. (In Russ.)
2. Nevolin O. A. [et al.]. *Forest inventory*. Arkhangelsk, Pravda Severa, 2003. 583 p. (In Russ.)
3. Grossberg S. P. *Forest management*. Nova Science Publishers, 2009. 329 p.
4. Staaf K. A. G., Wiksten N. A. *Tree harvesting techniques*. Springer Netherlands, 1984. 359 p.
5. Magnussen S. [et al.]. *Continuous cover forestry: assessment, analysis, scenarios*. Springer Netherlands, 2002. 348 p.
6. Higman S., Mayers J., Bass S., Judd N. *The sustainable forestry handbook*. VIVA BOOKS PVT.LTD, 2004. 350 p.
7. Vasiliev V. V. Analysis of common transport and technological schemes of water transport of timber. *Scientific Journal of young Scientists of the Oryol State Agrarian University*, 2019, no. 4 (17), pp. 48—52. (In Russ.)
8. *Handbook on water transport of forests*. Under the General editorship of V. A. Shcherbakov. Moscow, Forest industry, 1986. 384 p. (In Russ.)
9. Patyakin V. I., Dmitriev Yu. Ya., Zaitsev A. A. *Water transport of timber: textbook for universities*. Moscow, Lesnaya Promyshlennost, 1985. 336 p. (In Russ.)
10. Lebedev N. I., Pominova G. I. *Water transport of the forest*. Ed. 2-e pererabot. Moscow, Forest industry, 1974. 304 p. (In Russ.)
11. Gavrilova E. N. [et al.]. *Water transport of forests: handbook*. Moscow, Goslesbumizdat, 1963. 560 p. (In Russ.)
12. 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.
13. Brevet 2882723 FR, Int. Cl.8 B63B 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 03.03.2005; la date de parution 21.10.2005, bulletin 06/36. 14 p.

14. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. *Improved systems of raft timber alloy*. Saarbrucken (Germany), Publishing house LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 284 p. (In Russ.)
15. Patent 5119529 USA, Int. Cl.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.
16. 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.)
17. 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.)
18. Vasiliev V. V. Improved transport and technological scheme for the supply of wood by water transport in flat-flow units on the principle of raft (ruler) — 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. 341—346. (In Russ.)
19. Vasiliev V. V. Timber rafting planning in flat rafting units. *Innovative technologies and technical means for the agro-industrial complex: Materials of the international. scientific and practical. Conference of young scientists and specialists; Voronezh, November 11—12, 2021*. Voronezh, FGBOU VO «Voronezh SAU», 2021, pp. 214—216. (In Russ.)
20. Vasiliev V. V. Organization of timber rafting based on flat rafting units. *Modern resource-saving technologies and technical means of the forest complex: Materials All-Russian Scientific and Practical Conference, Voronezh, November 25—26, 2021*. Voronezh, FGBOU VO «VGLTU», 2021, pp. 7—10. Available at: <https://vgltu.ru/nauka/konferencii/2021/srtrtsl/>. Text. Image: electronic. (In Russ.)
21. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Abramov V. V., Pozdnyakov E. V. Patent 210485 R. F., IPC B63B 35/62. 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. 2021125409; application 19.10.2020; publ. 18.04.2022, Byul. no. 11. 5 p. (In Russ.)
22. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. Requirements for the diameters of round timber to ensure the rigidity of a flat rafting unit. *Resources and Technology*, 2024, vol. 21, no. 3, pp. 39—56. doi: 10.15393/j2.art.2024.7483. (In Russ.)
23. 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.)
24. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Abramov V. V., Pozdnyakov E. V. Patent 2811178 R. F., IPC B63B 35/62. Raft. Applicant and patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov» (RU), no. 202312179; application 21.08.2023; publ. 11.01.2024, Byul. no. 2. 9 p. (In Russ.)
25. Vasiliev V. V. Modernized raft based on a modern flat rafting unit. *Actual problems of agro-industrial complex energy in modern reality: Materials International Scientific and Practical conference dedicated to the founder of the Faculty of Energy and Electrification Valentin Vasilyevich Fokin; Izhevsk, May 15, 2024*. Izhevsk, Udmurt State University, 2024, pp. 90—95. Available at: <https://udsau.ru/news/novosti/17699-aktualnye-problemy-energetiki-apk-v-sovremennoj-realnosti.html>. Text. Image: electronic. (In Russ.)
26. Lebedev A. N. *Water transport of the forest*. Leningrad, Goslestehizdat, 1939. 464 p. (In Russ.)
27. Belyayev N. M. *Problems in strength of materials*. Elsevier, 1966. 539 p.

28. Stephens R. C. *Strength of materials. Theory and examples*. Edward Arnold, 1970. 314 p.
29. Patnaik S., Hopkins D. *Strength of materials: a new unified theory for the 21st century*. Butterworth; Heinemann (Elsevier), 2004. 771 p.
30. Boresi A. P., Schmidt R. J., Sidebottom O. M. *Advanced mechanics of materials*. Wiley, 1993. 827 p.
31. Broutman L. *Interfaces in composites*. ASTM, 1968. 198 p.
32. Skalmierski B. *Mechanics and strength of materials*. Academic Press, Elsevier, 1979. 435 p.
33. Komarovskiy A. A., Astakhov V. P. *Physics of strength and fracture control: adaptation of engineering materials and structures*. CRC Press, 2002. 629 p.
34. Donskoy I. P. *Water transport of the forest*. Moscow, Goslesbumizdat, 1955. 332 p. (In Russ.)
35. 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.)
36. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Pozdnyakov E. V. Certificate of state registration of the computer program 2022660776. The program for planning wood alloy in rafts based on flat raft units; applicant and copyright holder of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov» (RU). Claimed on 08.06.2022, registered on 08.06.2022. (In Russ.).

DOI: 10.15393/j2.art.2024.8203

УДК 004.942, 630.387.33

Статья

Гидродинамическое сопротивление лесотранспортных единиц новой конструкции

Мануковский Андрей Юрьевич

*доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Российская Федерация),
manu1964@mail.ru*

Шадрина Яна Витальевна

*соискатель учёной степени кандидата наук, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Российская Федерация),
ya.shadrina@narfu.ru*

Получена: 12 ноября 2024 / Принята: 28 ноября 2024 / Опубликовано: 6 декабря 2024

Аннотация: В статье приведены результаты экспериментальных исследований неустановившегося движения лесотранспортных единиц в условиях влияния мелководья. Для рек с малыми глубинами предложена сплочная единица, состоящая из четырёх пучков малого объёма (до 5 м³), соединённых между собой с помощью крепёжных брёвен и гибких связей. Выполнены экспериментальные исследования движения лесотранспортных единиц в условиях влияния мелководья. Лесотранспортные единицы (ЛТЕ) формировались из 1...6 сплочных единиц. Исследования проводились на моделях масштаба 1:20. Соотношение длины ЛТЕ к её ширине изменялось от 1 до 6. При равномерном движении моделирование выполнено по критерию Фруда в интервале от 0,16 до 0,48, а при неустановившемся — по критериям Фруда и гомохронности. Опыты проведены при числах Рейнольдса $3,1 \cdot 10^4 \dots 5,5 \cdot 10^5$. Модели буксировались при поперечном расположении лесоматериалов в диапазоне скоростей 0,1...0,3 м/с. Движение моделей фиксировалось бесконтактным оптическим датчиком оборотов. Датчик обеспечивал формирование импульсов, частота повторений которых пропорциональна частоте прохождения тахометрических меток, нанесённых на вращающийся блок со светоотражающим покрытием. Изменение частоты импульсов по времени фиксировалось на компьютере с помощью программы ZetPanel. Для каждой модели получены квадратичные зависимости силы сопротивления воды

равномерному движению лесотранспортных единиц от скорости движения модели. Сопротивление неустановившемуся поступательному движению лесотранспортных единиц представлено как сопротивление воды равномерному движению лесотранспортных единиц и дополнительное сопротивление, возникающее при неустановившемся движении. При исследовании неустановившегося движения лесотранспортных единиц такие величины, как присоединённая масса; масса воды в пустотах лесотранспортных единиц; возникающее дополнительное сопротивление, учитываются коэффициентом нестационарности. Для всех моделей получены зависимости коэффициента нестационарности от относительной скорости движения лесотранспортных единиц при соотношении глубины к осадке 7, 5, 4, 2.7, 1.6. Полученные результаты позволяют определить время и путь разгона лесотранспортных единиц. Можно решать и другие задачи, например, найти необходимую силу разгона для достижения за определённое время заданной скорости движения лесотранспортных единиц.

Ключевые слова: сплottedная единица; неустановившееся движение; сопротивление воды; коэффициент нестационарности

DOI: 10.15393/j2.art.2024.8203

Article

Hydrodynamic resistance of rafting units of new design

Andrey Manukovsky

D. Sc. in engineering, professor, Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov (Russian Federation), mayu1964@mail.ru

Yana Shadrina

PhD applicant, Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov (Russian Federation), ya.shadrina@narfu.ru

Received: 12 November 2024 / Accepted: 28 November 2024 / Published: 6 December 2024

Abstract: The article presents the results of experimental data analysis of the logs rafting units' unsteady motion under the shallow waters effect. A float unit composed of four small volume bundles (up to 5 cubic meters) linked by the means of the fastening logs and flexible couplings has been proposed for rafting in shallow rivers. As the result of experimental research the mathematical model of hydrodynamic resistance was obtained. The timber transport units (TTU) included from 1 to 6 raft sections. The study was performed with a 1 : 20-scaled model. The length-to-width ratio of the TTU varied from 1 to 6. Froude scaling was performed over the range from 0.16 to 0.46 in case of uniform motion of the TTU. The experiments in unsteady motion conditions were performed using Froude scaling and Ho-criterion. The experiments were performed within the Reynolds number range of $3.1 \cdot 10^4 \dots 5.5 \cdot 10^5$. The models were towed at speeds of 0.1...0.3 m/sec. Quadratic dependences of the water resistance force to the velocity of the uniform motion of the TTU models have been derived. The water resistance in the case of the TTU non-stationary motion is represented as the latter one for the uniform motion plus additional resistance arising during non-stationary motion. The values taken into account as the aggregated nonstationarity coefficient included: entrained water, body of water in the TTU cavities and additional water resistance. Dependences of the nonstationarity coefficient to the relative motion speed for all TTU models at the depth / draft ratios of 7.0; 5.0; 4.0; 2.7; 1.6 have been derived. The results obtained allow the researchers to determine the TTU acceleration time and starting

course. Some additional tasks become solvable. For instance, necessary acceleration force for attainment of a TTU predetermined motion speed can be found.

Keywords: rafting unit; water tractive resistance; nonstationarity factor

1. Введение

На сегодняшний день актуальной проблемой лесного комплекса является транспортировка древесины от места заготовки. Лесные ресурсы, располагающиеся вблизи доступных транспортных путей, уже почти исчерпаны. В свою очередь, удалённые лесные массивы из-за отсутствия необходимой транспортной инфраструктуры не осваиваются.

Традиционно заготовленная древесина поставляется потребителю водным и сухопутным транспортом. Основу водного транспорта составляют судовые перевозки и зимняя береговая сплотка лесоматериалов с дальнейшим выводом их в плоты в весенний период. Для увеличения объёмов транспортировки лесоматериалов по внутренним водным путям необходимо совместно с зимней береговой сплоткой и судовыми перевозками восстановить навигационную сплотку древесины и разработать новые технологии сплава лесоматериалов, которые позволят вновь задействовать малые и средние реки. Для организации сплава по малым и средним рекам необходимы лесотранспортные единицы (ЛТЕ), обладающие малой осадкой, при этом имеющие высокие коэффициент полнодревесности и прочность. Также стоит отметить изменения, связанные с качественным составом лесных ресурсов. Доля лиственных пород постепенно увеличивается, что в перспективе должно привести к развитию технологий использования лиственной древесины.

Всем вышеперечисленным требованиям отвечает разработанная сплоточная единица (СЕ) [11], состоящая из четырёх пучков малого объёма (до 5 м³), соединённых между собой с помощью крепёжных брёвен 3 и гибких связей 4, закреплённых фиксаторами 5 (рисунок 1).

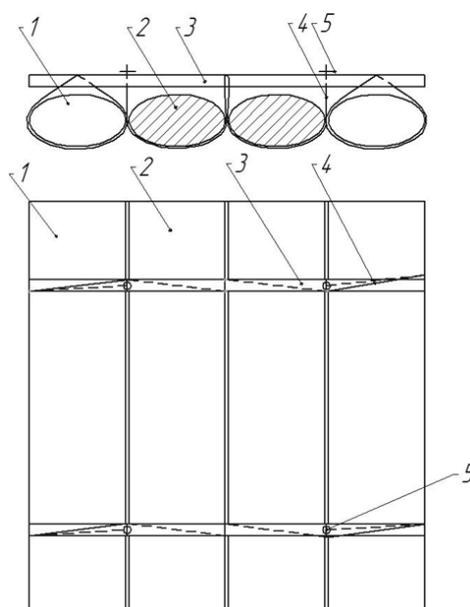


Рисунок 1. Сплоточная единица [рисунок авторов]

Figure 1. A float unit

Конструкция СЕ позволяет сплавливать листовые сортаменты. При этом пучки из листовых сортаментов 2 устанавливаются между пучками из хвойных сортаментов 1. К достоинствам исследуемой нами СЕ можно отнести простоту формирования, высокую прочность и довольно большой объём при сравнительно малой осадке. Исследования гидродинамического сопротивления ЛТЕ, состоящих из предложенных СЕ, позволяют разработать научно обоснованные технические решения для лесосплава по малым и средним рекам.

Ранее вопросом организации сплава по рекам с малыми глубинами занимались А. А. Митрофанов [7], В. Я. Харитонов [14], Д. Н. Афоничев [2], А. Ю. Мануковский [6]. Изучению гидродинамических характеристик плоских сплотовых единиц, предназначенных для сплава по рекам с малыми глубинами, посвящены работы П. Н. Перфильева [13], О. В. Мурашовой [8]. В работах Д. Н. Афоничева [1], В. В. Васильева [11] приведены результаты исследований гидродинамических характеристик плотов, содержащих плоские сплотовые единицы стабилизированной плавучести. Особый интерес вызывают работы, связанные с изучением разгона, торможения и остановки ЛТЕ. Одним из первых неустановившееся движение ЛТЕ исследовал В. А. Щербаков [15]. Наиболее основательно данные вопросы отражены в трудах А. А. Митрофанова [8], М. М. Овчинникова [9], А. Ю. Мануковского [5], В. П. Корпачева [4], при развороте ЛТЕ — В. А. Барабанова [3].

Разработанная СЕ обладает конструктивными особенностями, отличающими её от других ЛТЕ, исследуемых ранее другими авторами. Таким образом, будут различными и гидродинамические характеристики. Эти отличия позволяют сделать вывод о целесообразности выполненных нами исследований.

2. Материалы и методы

В статье представлены результаты исследования по неустановившемуся движению, в частности, по разгону ЛТЕ.

Эксперименты по изучению неустановившегося движения ЛТЕ проводились в опытном бассейне гравитационного типа [16]. Его ширина 3 м, длина 14 м, глубина 0,35 м. Размеры бассейна по ширине обеспечивали условия неограниченности потока. ЛТЕ состояли из 1...6 разработанных нами СЕ. Исследования проводились на моделях в масштабе 1:20 (фото 1). Моделирование неустановившегося движения ЛТЕ в этом масштабе считается надёжным, т. к. отсутствие масштабного эффекта было экспериментально подтверждено на моделях и в натуральных условиях [7]. Рассматривался следующий диапазон размеров: высота СЕ $H = 0,05$ м; отношение глубины наполнения бассейна к осадке $h/T = 7, 5, 4, 2,7, 1,6$; отношение длины ЛТЕ к её ширине $L/B = 1...6$. Коэффициент полнодревесности ЛТЕ $\eta = 0,5$.

При равномерном движении моделирование выполнено по критерию Фруда в интервале $0,16...0,48$, а при неустановившемся — по критериям Фруда и гомохронности. Опыты проведены при числах Рейнольдса $3,1 \cdot 10^4 ... 5,5 \cdot 10^5$, где l — длина линейки.

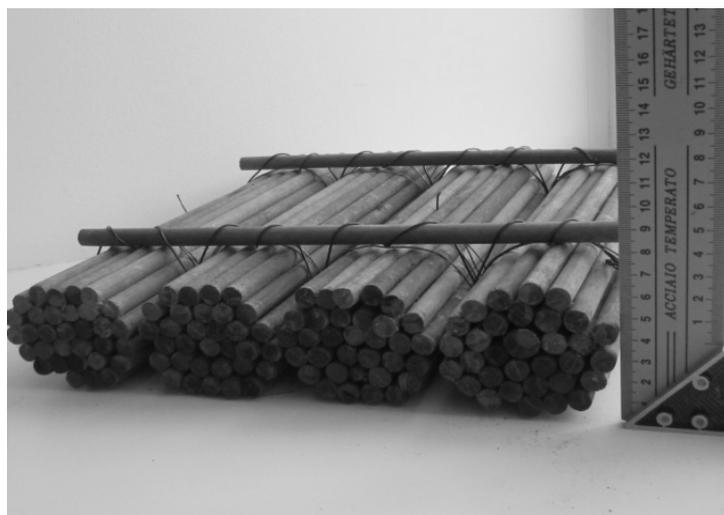


Фото 1. Модель исследуемой сплочной единицы [фото авторов]

Photo 1. Model of the float unit

Модели буксировались при поперечном расположении модельных брёвен. Был задан диапазон скоростей равномерного движения ЛТЕ v_p , 0,1...0,3 м/с, что соответствует натурным условиям — 0,45...1,2 м/с. Заданную скорость устанавливали в зависимости от массы буксируемого груза. Каждый эксперимент проводился не менее пяти раз для каждого значения скорости. В итоге было обработано 750 опытов.

Чтобы передать тяговое усилие, была использована трёхкратная полиспастная система. Эта система состояла из двух полиспастов: один передавал усилие тяги, а второй — усилие торможения. Блоки полиспастов выполнены из оргстекла и установлены на подшипниках. Диаметр каждого блока 100 мм, а толщина 4 мм.

В дальнейшем для сокращения записей эксперименты обозначаются кодом, состоящим из трёх цифр. Первая цифра указывает количество СЕ в ЛТЕ (1 — одна СЕ, 2 — две СЕ и т. д. до 6), вторая — серию экспериментов, т. е. при какой скорости, соответствующей натурной, буксировалась модель (1 — 1,2 м/с; 2 — 1,0 м/с; 3 — 0,8 м/с; 4 — 0,6 м/с; 5 — 0,45 м/с), третья — порядковый номер в серии. Отдельно указывается параметр h/T .

В каждом опыте собирались данные о трёх режимах движения: разгоне, равномерном движении, торможении. Для анализа использовали только данные по разгону и равномерному движению модели. Движение моделей регистрировалось бесконтактным оптическим датчиком оборотов. Датчик создавал импульсы, частота повторения которых была пропорциональна частоте прохождения тахометрических меток, расположенных на вращающемся блоке со светоотражающим покрытием. Изменения частоты импульсов по времени фиксировались на компьютере с использованием программы ZetPanel. Для обработки полученных данных в программном обеспечении Microsoft Office Excel авторы создали макрос на языке Visual Basic for Applications.

Сила сопротивления воды равномерному движению ЛТЕ определяется по формуле

$$R = c \frac{\rho}{2} \Omega v_p^2, \quad (1)$$

где c — безразмерный коэффициент сопротивления движению; ρ — плотность жидкости, кг/м^3 ; Ω — характерная площадь (площадь миделя $B \times T$), м^2 .

Для каждой модели получены зависимости вида $R = av_p^2$ (рисунок 2).

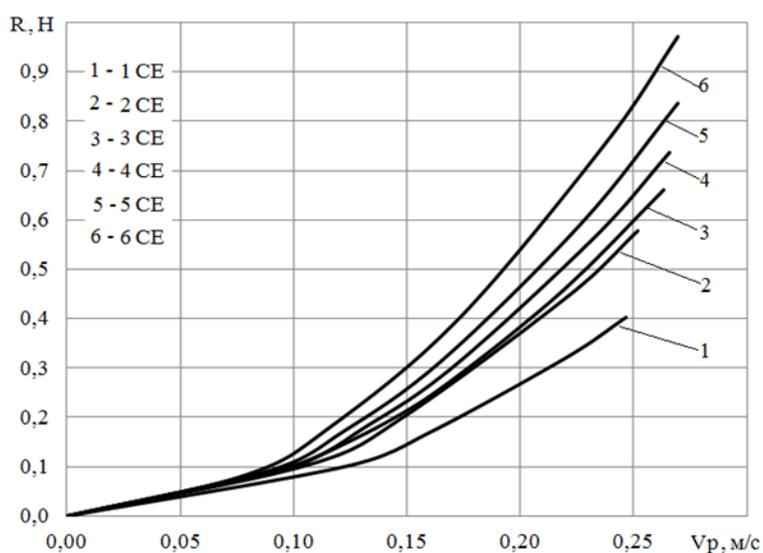


Рисунок 2. Графики зависимости сопротивления воды от скорости движения моделей при $h/T = 5$ [рисунок авторов]

Figure 2. Graphs of the dependence of water resistance on the speed of models movement at $h/T = 5$

Значения параметра a представлены в таблице 1. Коэффициент детерминации 0,99.

Таблица 1. Значение параметра a , $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2$

Table 1. Value of parameter a , $\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$

H/T	Для ЛТЕ при L/B					
	1	2	3	4	5	6
1,6	10,2	13,7	14,4	14,6	16,2	18,1
2,7	8,9	11,1	12,5	13,7	13,8	15,5
4	8,4	10,0	11,1	11,3	12,1	13,4
5	6,6	9,1	9,5	10,4	11,4	13,4
7	6,5	8,0	8,7	10,0	10,9	13,3

В общем случае главный вектор гидродинамических сил, действующих на объект при движении в вязкой несжимаемой жидкости, определяется как сумма трёх сил: силы плавучести P_p , инерционной гидродинамической силы $P_{ин}$ и вязкостной гидродинамической силы P_{ω} :

$$P = \overline{P_p} + \overline{P_{ин}} + \overline{P_{\omega}}.$$

Равнодействующая сил плавучести и веса ЛТЕ при отсутствии уклона свободной поверхности равна нулю.

Инерционная сила определяется по формуле

$$P_{ин} = \lambda_m \frac{dv}{dt},$$

где λ_m — присоединённая масса; dv/dt — ускорение движения тела, m/c^2 .

Проекция вязкостного компонента главного вектора гидродинамических сил на направление, противоположное поступательной скорости центра тяжести, даёт формулу для силы гидродинамического сопротивления ЛТЕ, определённую уравнением (1). Сила сопротивления при неустановившемся поступательном движении ЛТЕ представляет собой сумму двух сил:

$$R' = R \pm \Delta R_{нест},$$

где R — сопротивление воды равномерному движению ЛТЕ, вычисленное по гипотезе стационарности, Н; $\Delta R_{нест}$ — дополнительное сопротивление, возникающее при неустановившемся движении, Н.

Масса ЛТЕ, определяющая её инерционные характеристики, состоит из суммарной массы древесины, коры и такелажа M_d и некоторой части воды M_B , которая заполняет пространства внутри ЛТЕ.

В соответствии с теоремой об изменении количества движения тела, согласно которой производная по времени от количества движения тела равна главному вектору всех действующих на тело сил:

$$\frac{d(M_d + M_B + \lambda_m) \cdot v}{dt} = -F + P, \quad (2)$$

где F — главный вектор внешних сил, Н.

Взаимозависимые переменные λ_m , M_B , и $\Delta R_{нест}$ изменяются при различных режимах движения ЛТЕ. Их теоретическое или экспериментальное определение по отдельности невозможно. Коэффициент нестационарности движения n , объединяющий их, определяется следующим образом [8]:

$$n = \frac{\lambda_m + M_B \pm \Delta R_{нест}}{M_d} \frac{dv}{dt}. \quad (3)$$

Эксперименты, проведённые различными авторами [7], [13], показали, что масса воды в ЛТЕ остаётся постоянной при её движении по поверхности воды. В этом случае сила буксировки моделей принимается за главный вектор внешних сил F . С учётом уравнения (3) уравнение (2) принимает следующий вид:

$$M_{\text{д}}(1+n)\frac{dv}{dt} = -R + F. \quad (4)$$

В результате было получено выражение для экспериментального определения значений коэффициента n :

$$n = \frac{F - av^2}{M_{\text{д}} \frac{dv}{dt}} - 1.$$

При известных значениях F , a и $M_{\text{д}}$ для расчёта коэффициента n были определены мгновенные значения ускорения разгона ЛТЕ.

При обработке результатов опытов по разгону моделей были получены зависимости скорости и ускорения модели от времени вида:

$$v = v_p - a_v e^{-qt};$$
$$\frac{dv}{dt} = a_a e^{-qt},$$

где a_v , a_a , q — параметры, определяемые экспериментально.

3. Результаты

Пример результатов обработки разгона ЛТЕ серии опытов 23 при $h/T = 5$ приведён в виде графиков на рисунке 3. Коэффициенты детерминации для первой и второй зависимостей 0,99.

Полученные для всех моделей графики $n = f(v/v_p)$ аппроксимированы линейными уравнениями вида:

$$n = n_1 + n_2 \frac{v}{v_p}, \quad (5)$$

где n_1 , n_2 — параметры эмпирической формулы.

Коэффициенты n_1 и n_2 в уравнении (5) можно представить в виде функции от отношения L/B ЛТЕ (рисунок 4):

$$n_1 = f(L/B), \quad n_2 = f(L/B).$$

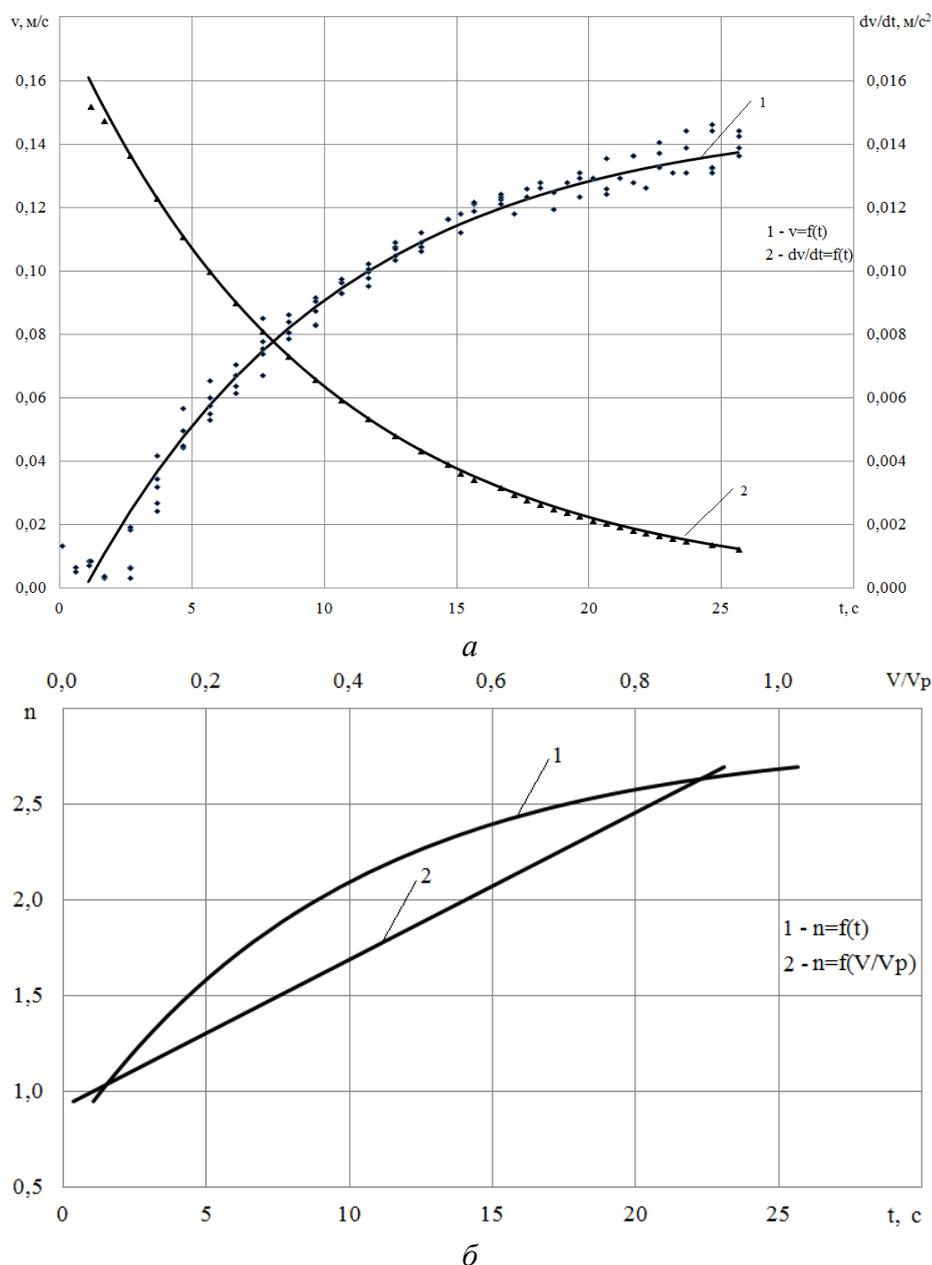


Рисунок 3. Результаты обработки серии опытов 23 по разгону модели при $h/T = 5$: *a* — графики зависимости v , dv/dt от времени t ; *б* — графики зависимости n от безразмерной скорости v/v_p и от времени t [рисунок авторов]

Figure 3. Results of processing the series of experiments 23 on acceleration of the model at $h/T = 5$: (a) graphs of the dependence of v , dv/dt on time t ; (b) graphs of the dependence of n on the dimensionless speed v/v_p and on time t

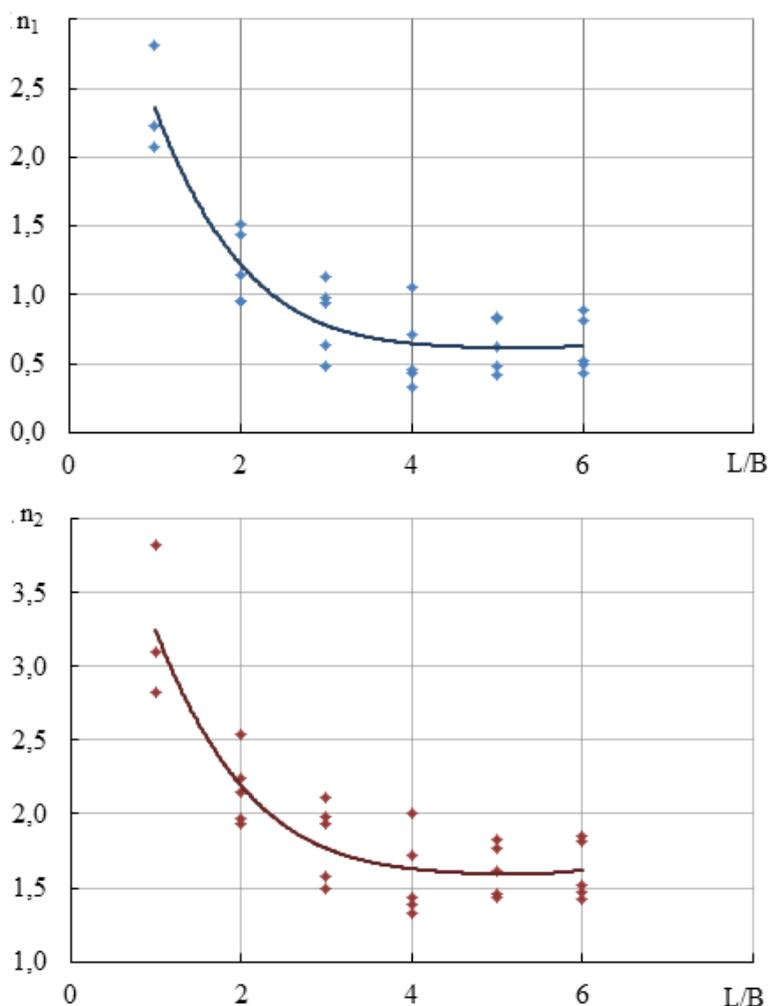


Рисунок 4. Графики зависимости $n_1 = f(L/B)$; $n_2 = f(L/B)$ при $h/T = 1,6 \dots 7,0$ [рисунок авторов]

Figure 4. Graphs of dependence $n_1 = f(L/B)$; $n_2 = f(L/B)$ при $h/T = 1,6 \dots 7,0$

Для каждой модели были определены значения коэффициентов n_1 и n_2 при отношении h/T в указанном диапазоне от 1,6 до 7,0, при котором влияние дна на гидродинамическое сопротивление отсутствует (таблица 2).

По результатам экспериментальных исследований обработано 134 серии опытов разгона ЛТЕ и получены расчётные формулы для определения коэффициентов n_1 и n_2 , справедливые для отношений h/T от 1,6 до 7:

$$\begin{aligned} n_1 &= 0,01(L/B)^4 - 0,19(L/B)^3 + 1,23(L/B)^2 - 3,70L/B + 5,02 \\ n_2 &= 0,01(L/B)^4 - 0,17(L/B)^3 + 1,12(L/B)^2 - 3,38L/B + 5,67 \end{aligned} \quad (6)$$

Коэффициенты детерминации при этом $r^2 = 0,86$ и $r^2 = 0,81$ для $n_1 = f(L/B)$ и $n_2 = f(L/B)$ соответственно.

Таблица 2. Значения коэффициентов n_1 и n_2

Table 2. Values of coefficients n_1 и n_2

H/T	L/B	n_1	n_2	H/T	L/B	n_1	n_2
1,6	1	2,23	3,10	2,75	1	2,07	2,83
	2	1,14	2,15		2	1,44	2,24
	3	0,63	1,58		3	0,95	1,94
	4	0,45	1,39		4	1,05	2,01
	5	0,63	1,61		5	0,85	1,77
	6	0,53	1,52		6	0,89	1,85
4	1	2,816	3,83	5	1	—	—
	2	1,509	2,54		2	0,952	1,97
	3	1,136	2,11		3	0,4881	1,49
	4	0,717	1,72		4	0,4298	1,43
	5	0,831	1,83		5	0,4267	1,43
	6	0,814	1,82		6	0,4973	1,47
7	1	—	—				
	2	0,96	1,94				
	3	0,98	1,98				
	4	0,33	1,33				
	5	0,49	1,46				
	6	0,43	1,42				

Задаваясь размерами ЛТЕ и используя формулы (5) и (6), можно определить коэффициент n для любой величины безразмерной скорости v/v_p .

Результаты экспериментальных исследований по определению n_1 и n_2 на «глубокой» воде ($h/T = 7$) сопоставимы с результатами, полученными А. А. Митрофановым [7].

4. Обсуждение и заключение

Надёжная транспортировка ЛТЕ возможна при условии их управляемости. Это особенно важно в речных условиях при расхождении со встречными судами, на поворотах и участках с поперечным течением. Управляемость ЛТЕ достигается при скорости буксировки относительно потока от 0,4 до 0,9 м/с. При проведении технологических расчётов переместительных операций с ЛТЕ необходимо знать время и путь разгона ЛТЕ до скорости, при которой обеспечивается их управляемость.

Полученные результаты и решения уравнения (4) позволяют определить время и расстояние, которое требуется для разгона лесотранспортных средств. Также можно решить другие задачи, например, вычислить необходимую силу разгона для достижения определённой скорости движения ЛТЕ, близкой к равномерной, за конкретный период времени.

Список литературы

1. *Афоничев Д. Н., Папонов Н. Н., Васильев В. В.* Сплоточная единица стабилизированной плавучести // ИВУЗ «Лесной журнал». 2010. № 6. С. 114—120.
2. *Афоничев Д. Н., Васильев В. В., Папонов Н. Н.* Совершенствование конструкции плота для сплава древесины по рекам с малыми глубинами // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). 2012. № 76 (2). С. 1—10. Текст: электронный.
3. *Барабанов В. А.* Исследование разворота лесотранспортной единицы при неустановившемся режиме движения // Материалы Всерос. конф. «Химико-лесной комплекс / Проблемы и решения». Красноярск, 2002. С. 71—76.
4. *Корпачев В. П.* Общий вид дифференциальных уравнений движения лесотранспортных единиц в водном потоке // Технология, комплексная механизация лесозаготовительных работ и транспорт леса. Л.: ЛТА, 1972. С. 112—117.
5. *Мануковский А. Ю., Подойницын К. С., Завершинская О. В.* Исследование гидродинамического сопротивления движению сортиментных плотов // Лесотехнический журнал. 2011. № 3. С. 83—87.
6. *Мануковский А. Ю., Макаров Д. А.* К вопросу о сплаве леса по рекам с малыми глубинами // Леса России в XII веке: Материалы Девятой междунар. научно-техн. интернет-конф. Сент., 2012 г. СПб., 2012. С. 90—93.
7. *Митрофанов А. А.* Лесосплав. Новые технологии, научное и техническое обеспечение. Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2007. 492 с.
8. *Мурашова О. В., Митрофанов А. А.* Исследования гидродинамических характеристик плоских плоточных единиц на моделях и в натуральных условиях // Известия вузов. Лесной журнал. Архангельск: САФУ, 2007. № 1. С. 58—66.
9. *Овчинников М. М., Родионов П. М.* Сопротивление движению хлыстовых плотов // Лесная промышленность. 1979. № 6. С. 28—29.
10. Патент 115769, Р Ф, МПК В 65 G 69/20. Сплоточная единица / Г. Я. Суков, Я. В. Ватлина, Т. М. Шарова. Опубл. 10.05.2012, Бюл. № 13.
11. Патент 2475408 Р Ф, МПК В 63 В 35/62. Плот / Д. Н. Афоничев, В. В. Васильев, Н. Н. Папонов. Опубл. 20.02.2013. Бюл. № 5.
12. *Перфильев П. Н., Митрофанов А. А.* Исследования гидродинамических характеристик линеек из плоских плоточных единиц // Известия вузов. Лесной журнал. Архангельск: САФУ, 2009. № 1. С. 44—51.
13. *Суков Г. Я.* О влиянии массы воды в пустотах пучка брёвен на величину силы удара // Водный транспорт леса: Межвуз. сб. науч. тр. Красноярск: СибТИ, 1977. Вып. 5. С. 15—21.
14. *Харитонов В. Я.* Сборник избранных трудов. Архангельск: САФУ, 2010. 480 с.
15. *Щербаков В. А.* Исследование некоторых вопросов управления плотами при буксеровке в речных условиях: Дис. ... канд. техн. наук. Л., 1961. 120 с.
16. *Shadrina Ya .V., Surov G. Ya.* Research on models of the hydrodynamics resistance of timber transport units // International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM. Austria, 2018. Vol. 18, issue 3.2. P. 425—432.

References

1. Afonichev D. N., Paponov N. N., Vasiliev V. V. The rafting unit of stabilized buoyancy. *Forest journal*, 2010, no. 6, pp. 114—120. (In Russ.)
2. Afonichev D. N., Vasiliev V. V., Paponov N. N. Improving the construction of a raft for timber rafting on rivers with shallow depths. *Polythematic online electronic scientific Journal of the Kuban State Agrarian University (Scientific Journal KubSAU)*, 2012, no. 76 (2), pp. 1—10. Text. Image: electronic. (In Russ.)
3. Barabanov V. A. Investigation of turning maneuver of a timber transporting unit at non-stationary motion. *Proc. All-Russian conf. «Chemical-forest complex / Problems and solutions»*. Krasnoyarsk, 2002, pp. 71—76. (In Russ.)
4. Korpachev V. P. General view of differential equations of motion of timber transport units in a water stream. *Technology, integrated mechanization of logging operations and forest transport*, 1972, pp. 112—117. (In Russ.)
5. Manukovsky A. Yu., Podoynicyn K. S., Zavershinskaya O. V. Investigation of hydrodynamic resistance to motion of the log rafts. *Forestry Engineering Journal*, 2011, no. 3, pp. 83—87. (In Russ.)
6. Manukovsky A. Yu., Makarov D. A. On the issue of rafting forests along rivers with shallow depths. *Forests of Russia in the XII century: Materials of the ninth international scientific and technical Internet conference*. September 2012. Saint Petersburg, 2012, pp. 90—93. (In Russ.)
7. Mitrofanov A. A. Timber rafting. New technologies, scientific and technical support. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2007. 492 p. (In Russ.)
8. Murashova O. V., Mitrofanov A. A. Studies of hydrodynamic characteristics of flat cohesive units on models and in field conditions. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal*. Arkhangelsk, SAFU, 2007, no. 1, pp. 58—66. (In Russ.)
9. Ovchinnikov M. M. Resistanse to motion of the tree-long log rafts. *Forest industry*, 1979, no. 11, pp. 28—29. (In Russ.)
10. Surov G. Ya., Vatlina Ya. V., Sharova T. M. R F Patent no. 115769, MPK B 65 G 69/20. The rafting unit. Published 10.05.2012, bull. no. 13. (In Russ.)
11. Afonichev D. N., Vasiliev V. V., Paponov N. N. R F Patent no. 2475408, IPC B 63 B 35/62. The raft. Published 02.20.2013, bull. no. 5. (In Russ.)
12. Perfiliev P. N., Mitrofanov A. A. Studies of hydrodynamic characteristics of lines made of flat cohesive units. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal*. Arkhangelsk, SAFU, 2009, no. 1, pp. 44—51. (In Russ.)
13. Surov G. Ya. About effect of mass of water in the voids of a log bundle on impact force. *Water timber transport*. Krasnoyarsk, SibTI Publ., 1977, vol. 5, pp. 15—21. (In Russ.)
14. Kharitonov V. Ya. Collection of selected works. Arkhangelsk, SAFU, 2010. 480 p. (In Russ.)
15. Shcherbakov V. A. Investigation of some issues of raft management during towing in river conditions: Dissertation of the Candidate of technical Sciences. Leningrad, 1961. 120 p. (In Russ.)
16. Shadrina Ya. V., Surov G. Ya. Research on models of the hydrodynamics resistance of timber transport units. *International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM*. Austria, 2018, vol. 18, issue 3.2, pp. 425—432.

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7964

УДК 631.6

Статья

Цепной рабочий орган для удаления крупных пней к экскаватору ЭТЦ-208

Орловский Сергей Николаевич

кандидат технических наук, доцент, Красноярский государственный аграрный университет (Российская Федерация), orlovskiysergey@mail.ru

Саая Сай-Суу Шолбановна

старший преподаватель, Тувинский государственный университет (Российская Федерация), sai-suu2014@yandex.ru

Получена: 12 мая 2024 / Принята: 28 ноября 2024 / Опубликовано: 25 декабря 2024

Аннотация: В данной статье формулируются предпосылки, на которых основывался выбор базовой машины. Определены требования, которым должна отвечать машина со сменным рабочим органом для удаления пней в условиях Сибири. Приведены результаты исследования рабочего органа такой машины. На полигоне института были проведены испытания в производственных условиях на объектах предприятия «Красноярскводстрой». Машина была вывезена в Большемуртинский район Красноярского края на мелиоративный объект, на котором имелись очень крупные пни. Целью этих испытаний ставилось: определить целесообразность использования экскаватора ЭТЦ-208 в качестве базы для измельчителя пней, определить технические возможности измельчителя пней в реальных условиях эксплуатации, ознакомить строителей с новым методом и модернизированной машиной по удалению пней, выявить потребность в машинах такого назначения в объединении «Красноярскводстрой» [4]. В отличие от макетного образца на новом рабочем органе было применено более надёжное легкосменное крепление резцов. После всесторонних испытаний на производственном объекте с целью уточнения ряда параметров, в т. ч. скорости резания, эта машина была передана строителям в производственную эксплуатацию. Разработанный и испытанный более совершенный третий образец рабочего органа ЭТЦ-208 работал со скоростью режущей цепи от 1,5 до 2,5 м/с, что сразу же позволило увеличить производительность машин в 1,5 раза. Результаты исследований показали правильность выбранного направления. Установлено, что модернизированная машина в процессе резания

пней работала стабильно. При этом удаление пня диаметром более 0,9 м производилось за два прохода рабочего органа на глубину 0,5—0,6 м. Размеры стружки и щепы по длине не превышали 0,2—0,3 м.

Ключевые слова: экскаватор; рабочий орган; резание; грунт; пень

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7964

Article

A flail attachment to excavator ETC-208 for grubbing

Sergey Orlovsky

Ph. D. in engineering, associate professor, Krasnoyarsk State Agrarian University (Russian Federation), orlovskiysergey@mail.ru

Say-Suu Saaya

senior lecturer, Tuva State University (Russian Federation), sai-suu2014@yandex.ru

Received: 12 May 2024 / Accepted: 28 November 2024 / Published: 25 December 2024

Abstract: This article formulates the prerequisites used to select a base machine. The authors determine the requirements to be met by a machine with an interchangeable working body for grubbing in Siberian conditions. The article presents the research results of the working body performance attached to a machine. The tests were performed in production conditions at the facilities of the enterprise «Krasnoyarskvodstroy». The machine was taken to Bolshemurtinskiy district of Krasnoyarsk region to the reclamation object with large stumps. The purposes of these tests were to determine the expediency of using the excavator ETC-208 as a base for the stump grubbing, to determine the technical capabilities of the stump grinder in real operating conditions, to familiarize the machine operators with the new method and modernized machine for stump removal, to identify the need for such machines in the association «Krasnoyarskvodstroy». In contrast to the mock-up model, the new working body was equipped with a more reliable and easily replaceable fastening of cutters. After comprehensive testing at the production site to specify a number of parameters including cutting speed, this machine was put into operation. The advanced third sample of the working body ETC-208 was tested. It worked at the cutting chain speed from 1.5 to 2.5 m/sec, which immediately increased the productivity of machines by 1.5 times. The results of research showed the correctness of the chosen direction. It was found that the modernized machine worked quietly in the process of stump cutting. At the same time, the removal of a stump with a diameter of more than 0.9 m was made in two passes of the working body to a depth of 0.5—0.6 m. The length dimensions of shavings and chips did not exceed 0.2—0.3 m.

Keywords: excavator; working body; cutting; soil; stump

1. Введение

В Сибири наиболее трудоёмкой операцией при производстве культуртехнических работ является удаление крупных пней. С целью повышения уровня механизации этого процесса было намечено разработать оборудование, способное удалять эффективные крупные пни диаметром более 0,45 м, в т. ч. в зимний период.

Для создания такой машины институтом СибНИИГиМ были проведены исследования по сменному устройству к экскаватору непрерывного действия. Эти работы выполнялись в содружестве с объединениями «Таллэкс» (изготовитель машин) и «Красноярскводстрой» (эксплуатирующая организация) [5].

Основными предпосылками, на которых основывался выбор базовой техники для создания устройства для удаления крупных пней методом их измельчения, явились следующие:

- Результаты исследований, проведённые нами с объединением «Таллэкс», выявили пути совершенствования экскаваторов предприятия «Таллэкс» для условий Сибири за счёт создания гаммы сменного оборудования, позволяющих значительно расширить область применения этих машин.
- Рабочий процесс резания грунта у экскаватора непрерывного действия близок рассматриваемому процессу резания пней, а значит, его переоснащение не потребует существенных материальных затрат, т. к. может быть использовано его рабочее оборудование.

Для реализации поставленной цели в качестве базовой машины был принят экскаватор типа ЭТЦ-208 (рисунок).



Рисунок. Экскаватор ЭТЦ-208

Figure. Excavator ETC-208

2. Материалы и методы

Серийный экскаватор ЭТЦ-208 предназначен для разработки траншей прямоугольного сечения в однородных мёрзлых и особо прочных талых грунтах при выполнении мелиоративных и общестроительных земляных работ.

Он представляет собой самоходную землеройную машину, выполненную на базе трактора Т-130,1.Г-2. Экскаватор имеет цепной рабочий орган и поперечно расположенный цепной скребковый транспортёр. Цепь рабочего органа выполнена в соответствии с нашим а. с. №604922. Подъём, опускание и принудительное заглубление рабочего органа в грунт осуществляется с помощью двух гидроцилиндров, штоки которых связаны с рамой рабочего органа. Привод рабочего органа осуществляется от вала отбора мощности трактора [6]. Привод транспортёра осуществляется от системы «насос — гидромотор» через планетарный редуктор.

Для уменьшения скорости рабочего хода на экскаваторе установлен гидромеханический ходоуменьшитель.

3. Результаты

На начальной стадии исследований были определены основные требования, которым должна отвечать машина со сменным рабочим органом для удаления пней в условиях Сибири [7]:

- Экскаватор ЭТЦ-208 после переоснащения должен измельчать крупные пни (более 0,5 м в диаметре), большие корни и т. п. непосредственно на вырубке в стружку и щепу, не требующую последующего удаления с поля перед почвообработкой.
- Породы и размеры удаляемых пней не должны иметь ограничений.
- Время удаления одного крупного пня (наиболее прочной в Сибири лиственничной породы диаметром 0,8...1,2 м) должно быть не более 60 мин., допускается иметь остатки от пня на глубине не более 0,3 м от поверхности почвы.
- Экскаватор ЭТЦ-208 со сменным рабочим органом должен сохранить своё основное назначение — возможность отрывки траншей.
- Удаление пней должно производиться круглогодично — в зимний и летний периоды.
- Переоборудование рабочего органа экскаватора ЭТЦ-208 должно осуществляться достаточно просто и быть усиленным для УМ и ПМК.

На основе перечисленных требований СибНИИГиМ разработал чертежи и изготовил к экскаватору ЭТЦ-208 экспериментальный рабочий орган — измельчитель пней. Экспериментальные исследования рабочего органа для измельчения пней проводились на лиственничных чурбаках длиной 2,5 м и диаметром 0,9...1,3 м, которые были предварительно закопаны вертикально в грунт. Высота установленных таким образом пней составляла 1—1,2 м [8]. С целью определения возможности перерезания залежной древесины

и крупных корней производилось также поперечное перерезание листовичных брёвен диаметром 0,9—1,3 м.

Результаты исследований показали правильность выбранного направления. Установлено, что машина в процессе резания пней работала спокойно. При этом удаление пня диаметром более 0,9 м производилось за два прохода рабочего органа на глубину 0,5—0,6 м. Размеры стружки и щепы по длине не превышали 0,2—0,3 м.

4. Обсуждение и заключение

После проведения исследований на полигоне института были осуществлены испытания в производственных условиях на объектах предприятия «Красноярскводстрой». Машина была вывезена в Большемуртинский район Красноярского края на мелиоративный объект, на котором имелись очень крупные пни. Целью этих испытаний ставилось:

- Определить целесообразность использования экскаватора ЭТЦ-208 в качестве базы для измельчителя пней.
- Определить технические возможности измельчителя пней в реальных условиях эксплуатации.
- Ознакомить строителей с новым методом и машиной по удалению пней.
- Выявить потребность в машинах такого назначения в объединении «Красноярскводстрой».

Густота пней на одном гектаре площади составляла 16—20 шт. Пни были наиболее прочной в Сибири листовичной породы. По существующему делению состав пней на объекте распределялся следующим образом (таблица 1).

Таблица 1. Состав пней на объекте

Table 1. Composition of stumps on site

Группа пней	Диаметр пня	Распределение в процентах от общего количества	Примечание
Очень крупные	0,4—0,6	45	Пни диаметром менее 0,4 м не встречались
Толстомерные	Более 0,6	55	Пни диаметром менее 0,4 м не встречались

Высота пней была различной — от 0,2 до 1,2 м. Некоторые пни за счёт пожаров были частично обуглены.

Техническая производительность сменного рабочего органа к экскаватору ЭТЦ-208, в зависимости от размеров пней, представлена в таблице 2.

Таблица 2. Техническая производительность сменного рабочего органа (первый вариант)

Table 2. Technical performance of the replaceable working element (first option)

Диаметр пня, м	Производительность по измельчению одного пня в минуту	Примечание
До 0,6	1,5	Без учёта переездов машины
0,6—1,0	5,0	Без учёта переездов машины
Более 1,0	20,0	Без учёта переездов машины

В результате проведённых исследований было установлено, что экскаватор ЭТЦ-208 со сменным рабочим органом для удаления крупных пней имеет ряд преимуществ по сравнению с существующими корчевателями вырывающего типа:

- Он должен измельчать пни, большие корни и т. п. непосредственно на вырубках, превращая их в щепу, которая может быть распахана в верхнем слое почвы или засыпана вперемешку с землёй в послепневом приямке. Возможен вариант сбора щепы для последующей переработки и использования. Размеры щепы составляют в основной массе не более 0,05 м, причём только 3—5 % достигали длины от 0,5 м.
- Оборудование не имеет ограничений в части размеров и твёрдости удаляемых пней.
- Им можно удалять пни круглогодично в зимний и летний периоды.
- У базового экскаватора расширяется область применения и увеличивается фондоотдача.

В процессе исследований выявилась целесообразность использовать экскаватор для резания пней вместе с корневой системой, которая расположена в непосредственной близости от поверхности почвы (не глубже 0,3 м). Такая технология представляется весьма перспективной, т. к. при сохранении гумусного слоя почвы позволяет сократить или полностью исключить операции по выкорчёвыванию, стряхиванию и сжиганию корневых и древесных остатков.

Сравнение существующих способов удаления крупных пней диаметров более 0,5 м с предлагаемым способом показывает, что его применение приводит к существенному сокращению количества операций при выполнении культуртехнических работ (таблица 3).

Из таблицы 3 видно, что при измельчении крупных пней количество операций будет сокращено в сравнении со взрывом в 6 раз, а с обрезанием корней машиной с цепным рабочим органом — в 4,5 раза. Кроме повышения качества работ улучшается безопасность труда. Следует отметить также, что при существующей технологии пни сжигают, при этом полное сгорание крупных пней не происходит [9], поэтому их остатки закапывают или вывозят за пределы поля.

Таблица 3. Сравнение способов удаления крупных пней

Table 3. Comparison of methods for large stumps removing

Существующий способ		Новый способ
Обрезка и корчевание	Взрыв и корчевание	Измельчение пней
Обрезка корневой системы баровой машиной	Сверление шпуров под закладку взрывчатых веществ	Измельчение пней методом сплошного резания сменным рабочим органом
Корчевание пней корчевателем типа МП-7А	Закладка взрывчатых веществ. Забивка шпуров, прокладка коммуникаций и средств управления взрывом	Засыпка послепневого приямка
Засыпка послепневых воронок	Взрыв пней	
Сгребание пней	Проверка полного срабатывания взрыва на площади корчёвки	
Просушка пней	Корчевание расколотых пней, корчеватель МП-7А	
Перетряхивание пней	Засыпка послепневых воронок	
Сжигание пней	Сгребание пней	
Повторное перетряхивание пней	Просушка пней	
Повторное сжигание пней	Перетряхивание пней	
	Сжигание пней	
	Повторное перетряхивание пней	
	Повторное сжигание пней	

В 1983—1984 гг. институтом был изготовлен и испытан второй образец сменного рабочего органа для измельчения крупных пней к улучшенному экскаватору марки ЭТЦ-208. В отличие от макетного образца на новом рабочем органе было применено более надёжное легкосменное крепление резцов. После всесторонних испытаний с целью уточнения ряда параметров, в т. ч. скорости резания, эта машина была передана строителям в производственную эксплуатацию.

В 1984—1985 гг. был разработан и испытан более совершенный третий образец рабочего органа. Скорость режущей цепи на нём была повышена с 1,5 до 2,5 м/с, что сразу позволило увеличить производительность машин на 50 %.

Средние значения производительности улучшенной машины при измельчении пней вместе с корневой системой в радиусе 0,8—1,2 м приведены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты хронометражных наблюдений по удалению пней усовершенствованным рабочим органом к экскаватору ЭТЦ-208В

Table 4. Results of timing observations on stump removal using the improved working tool for the ETC-208V excavator

Диаметр	Количество измельчённых пней	Производительность, шт./ч	
		За чистое время работы	За время полезной работы
0,5—1,4	52	6,34	2,51

Примечание:

1. Время чистой работы состоит из времени на рабочий процесс, маневрирование и рабочие переезды машины, т. е. времени на выполнение полного рабочего цикла.
2. Время полезной работы включает затраты времени на чистую работу, перерывы по технологическим причинам, регулировку механизмов, очистку, заливку горячей водой, запуск двигателя в зимний период и уход за экскаватором.

По результатам проведённых исследований авторами были разработаны, согласованы и утверждены «Заявка на разработку и освоение продукции» и «Агротехнические требования на сменный рабочий орган для измельчения пней к экскаватору ЭТЦ-208В».

Список литературы

1. Мударисов С. Г. Моделирование процесса взаимодействия рабочих органов с почвой // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2005. № 7. С. 27—30.
2. Орловский С. Н. Определение энергетических и динамических параметров тракторов, режимов резания активных рабочих органов машинно-тракторных агрегатов. Красноярск: КрасГАУ, 2011. 376 с.
3. Патент № 2202024. Рабочее оборудование землеройной машины / С. Н. Орловский. ВНИИПОМлесхоз, 15.10.2001.
4. Орловский С. Н., Карнаухов А. И. Теоретические предпосылки к обоснованию параметров и режимов работы роторных рабочих органов // Известия вузов. Лесной журнал. Архангельск: САФУ, 2012. № 4. С. 70—76.
5. Орловский С. Н., Карнаухов А. И. Методика расчёта рабочего органа агрегата для понижения пней // Известия вузов. Лесной журнал. Архангельск: САФУ, 2017. № 4. С. 106—115.
6. Орловский С. Н. Метод удаления крупных пней при культуртехнических работах их вырезанием по сферической поверхности // Ресурсосберегающие технологии механизации сельского хозяйства. Приложение к «Вестнику КрасГАУ». Красноярск, 2009. Вып. 5. С. 18—21.
7. Орловский С. Н. Измельчение малоценных деревьев при рубках ухода // Известия вузов. Лесной журнал. Архангельск: САФУ, 2018. № 5. С. 135—151.
8. Полетайкин В. Ф., Авдеева Е. В. Погрузочные машины: Учебное пособие. Красноярск: СибГТУ, 2001. 200 с.

9. Соколов М. Г. О типе корчевателей для мелиоративных работ // Особенности механизации гидротехнического строительства и использования мелиорируемых земель Сибири. Красноярск, 1977. С. 16—25.

References

1. Mudarisov S. G. Modeling the interaction of working bodies with the soil. *Tractors and agricultural machinery*, 2005, no. 7, pp. 27—30. (In Russ.)
2. Orlovsky S. N. Definition of energy and dynamic parameters of tractors, cutting modes of active working bodies of machine-tractor units. Krasnoyarsk, KrasSAU, 2011. 376 p. (In Russ.)
3. Orlovsky S. N. Patent No. 2202024. Working equipment of an earthmoving machine. VNIIPOMleskhoz, 15.10.2001. (In Russ.)
4. Orlovsky S. N., Karnaukhov A. I. Theoretical prerequisites for substantiating the parameters and operating modes of rotary working bodies. *Izvestiya vuzov. Forest magazine*. Arkhangelsk, NArFU, 2012, no. 4, pp. 70—76. (In Russ.)
5. Orlovsky S. N., Karnaukhov A. I. Methodology for calculating the working body of the unit for lowering stumps. *Izvestiya vuzov. Forest magazine*. Arkhangelsk, NArFU, 2017, no. 4, pp. 106—115. (In Russ.)
6. Orlovsky S. N. Method of removing large stumps during landscaping work by cutting them along a spherical surface. *Resource-saving technologies of agricultural mechanization. Supplement to the «Bulletin of KrasSAU*. Krasnoyarsk, 2009, issue 5, pp. 18—21. (In Russ.)
7. Orlovsky S. N. Crushing low-value trees during thinning. *Izvestiya vuzov. Forest magazine*. Arkhangelsk, NArFU, 2018, no. 5, pp. 135—151. (In Russ.)
8. Poletaikin V. F., Avdeeva E. V. Loading machines: a tutorial. Krasnoyarsk, SibGTU, 2001. 200 p. (In Russ.)
9. Sokolov M. G. On the type of rooters for melioration works. *Features of mechanization of hydraulic engineering construction and use of reclaimed lands of Siberia*. Krasnoyarsk, 1977, pp. 16—25. (In Russ.)