

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/1>

УДК 630 : 676.051.214



## Исследование энергетического баланса лесных терминалов, функционирующих на биотопливных источниках энергии

Иван А. Маганов<sup>1</sup>, [magavan17@mail.ru](mailto:magavan17@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0001-9156-4984>

Евгений А. Тихонов<sup>1</sup>, [tihonov@petsru.ru](mailto:tihonov@petsru.ru) <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

Сергей В. Петруша<sup>1</sup>, [ros-nano@yandex.ru](mailto:ros-nano@yandex.ru) <https://orcid.org/0009-0002-0879-6499>

Павел В. Трушевский<sup>2</sup>, [p.trushevskii@coal.bio](mailto:p.trushevskii@coal.bio) <https://orcid.org/0009-0000-5639-5492>

Владимир А. Морковин<sup>3</sup>, [morkovin-vladimir@mail.ru](mailto:morkovin-vladimir@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>

Ольга А. Куницкая<sup>4</sup>, [ola.ola07@mail.ru](mailto:ola.ola07@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, Российская Федерация

<sup>2</sup> ООО «Сибирский биоуголь», ул. Глаголева, 3, г. Калуга, Российская Федерация

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

<sup>4</sup> ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, Российская Федерация

В статье рассматривается возможность обеспечения устойчивой энергетической обеспеченности для удалённых лесных терминалов за счёт использования порубочных остатков в качестве источника энергии. Предложена технологическая цепочка для преобразования энергии порубочных остатков в электрическую энергию, включающая рубительную машину, парогенератор и паровую винтовую машину. Для обоснования системы машин для удалённых лесных терминалов была разработана математическая модель, реализованная в программном комплексе MS Excel. Эта модель помогает определить оптимальную систему машин для обеспечения энергией лесных терминалов, учитывая различные входные параметры, такие как объём заготавливаемого круглого леса, расстояние трелёвки, процент распиловки круглого леса и сушка пиломатериалов. Исходя из этих параметров, модель оптимизирует выбор используемого технологического оборудования для достижения максимальной производительности лесного терминала при определённом объёме топливной щепы, произведённой из порубочных остатков. Разработанная модель выявила ограничения в применении предложенной технологии, связанные в первую очередь с минимальным объёмом заготовки круглого леса за смену. Полученные данные показали, что для обеспечения эффективной работы лесного терминала необходим минимальный объём заготовки круглого леса, не менее 274 м<sup>3</sup> за смену. Кроме того, модель позволяет снизить пиковую энергетическую нагрузку за счёт оптимального распределения технологических процессов, таких как производство щепы, распиловка круглого леса и сушка пиломатериалов в течение смены. Система также обладает базой данных оборудования и техники, в которую можно вносить новые единицы. На основе этой информации система предлагает оптимальную комбинацию технического оборудования для улучшения эффективности работы лесного терминала. Кроме того, данная модель позволяет решить проблему излишнего скопления порубочных остатков, повысив их использование для производства электроэнергии и создавая экологически устойчивые решения в области энергетики.

**Ключевые слова:** энергетическая устойчивость, лесной терминал, порубочные остатки, биотопливо

**Финансирование:** часть материалов исследования получена за счёт гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства»

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Исследование энергетического баланса лесных терминалов, функционирующих на биотопливных источниках энергии / И. А. Маганов, Е. А. Тихонов, С. В. Петруша, П. В. Трушевский, В. А. Морковин, О. А. Куницкая // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 3 (55). – С. 5–22. – Библиогр.: с. 18–21 (25 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/1>.


*Поступила 23.08.2024. Пересмотрена 16.09.2024. Принята 17.09.2024. Опубликована онлайн 11.11.2024.*


## Article



### Study of the energy balance of forest terminals operating on biofuel energy sources

**Ivan A. Maganov**<sup>1</sup>, [magavan17@mail.ru](mailto:magavan17@mail.ru),  <https://orcid.org/0000-0001-9156-4984>

**Evgeny A. Tikhonov**<sup>1</sup>, [tikhonov@petsu.ru](mailto:tikhonov@petsu.ru),  <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

**Sergey V. Petrusha**<sup>1</sup>, [ros-nano@yandex.ru](mailto:ros-nano@yandex.ru),  <https://orcid.org/0009-0002-0879-6499>

**Pavel V. Trushevsky**<sup>2</sup>, [p.trushevskii@coal.bio](mailto:p.trushevskii@coal.bio),  <https://orcid.org/0009-0000-5639-5492>

**Vladimir A. Morkovin**<sup>3</sup>,  [morkovin-vladimir@mail.ru](mailto:morkovin-vladimir@mail.ru),  <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>

**Olga A. Kunitskaya**<sup>4</sup>, [ola.ola07@mail.ru](mailto:ola.ola07@mail.ru),  <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

<sup>1</sup> *Petrozavodsk State University, 33 Lenin Ave., Petrozavodsk, Russia*

<sup>2</sup> *Siberian Biougol LLC, 3 Glagoleva str., Kaluga, Russia*

<sup>3</sup> *Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 8 Timiryazeva str., Voronezh, Russia*

<sup>4</sup> *Arctic State Agrotechnological University, Sergelyakhskoe highway, 3 km, d. 3, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia*

#### Abstract

The article discusses the possibility of ensuring sustainable energy supply for remote forest terminals through the use of logging residues as an energy source. A technological chain has been proposed for converting the energy of logging residues into electrical energy, including a chipper, a steam generator and a steam screw machine. To justify the system of machines for remote forest terminals, a mathematical model was developed, implemented in the MS Excel software package. This model helps determine the optimal machine system for powering timber terminals, taking into account various input parameters such as volume of roundwood harvested, skidding distance, percentage of roundwood sawn and lumber drying. Based on these parameters, the model optimizes the choice of technological equipment used to achieve maximum productivity of the timber terminal for a certain volume of fuel chips produced from logging residues. The developed model revealed limitations in the application of the proposed technology, primarily associated with the minimum volume of roundwood harvested per shift. The data obtained showed that to ensure efficient operation of the timber terminal, a minimum volume of roundwood harvesting is required, at least 274 m<sup>3</sup> per shift. In addition, the model allows you to reduce peak energy load due to the optimal distribution of technological processes, such as chip production, sawing round wood and drying lumber during the shift. The system also has a database of equipment and machinery into which new units can be added. Based on this information, the system proposes the optimal combination of technical equipment to improve the efficiency of the timber terminal. In addition, this model addresses the problem of excess accumulation of logging residues, increasing their use for electricity production and creating environmentally sustainable energy solutions.

**Keywords:** *energy sustainability, forest terminal, logging residues, biofuel*

**Funding:** some of the research materials were obtained through a grant from the Russian Science Foundation No. 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

**Acknowledgments:** authors thank the reviewers for their contribution to the peer review. The work was carried out within the framework of the scientific school "Innovative developments in the field of logging industry and forestry".

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Maganov I.A., Tikhonov E.A., Petrusha S.V., Trushevsky P.V., Morkovin V.A., Kunitskaya O.A. (2024). Study of the energy balance of forest terminals operating on biofuel energy sources. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 3 (55), pp. 5-22 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/1>.

*Received* 23.08.2024. *Revised* 16.09.2024. *Accepted* 17.09.2024. *Published online* 11.11.2024.

## Введение

В соответствии со стратегий развития Арктики до 2035 г. согласно соответствующему Указу Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645 (в ред. от 27 февраля 2023 г.) «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года», предусматривается активное освоение лесных ресурсов соответствующих субъектов Российской Федерации [1]. Особенности данных регионов являются большие расстояния и слаборазвитая энергетическая и транспортная инфраструктура. Например, в Республике Саха (Якутия) плечо вывоза при транспортировке круглого леса составляет уже более 300 км [2-4].

Помимо роста расходов на транспортно-логистические составляющие, связанные с увеличением плеча вывоза древесины, присутствует проблема низкого коэффициента полнодревесности ввоза, который, как правило, не превышает 0,67 [5].

Использование лесных терминалов представляет собой эффективный метод решения данной проблемы. Терминалы служат производственными участками, где из круглого леса получают различные полуфабрикаты и готовые пиломатериалы [6]. На лесных терминалах проводится первичная обработка древесины, в том числе производство бруса, что повышает коэффициент полнодревесности ввоза при последующей вывозке. При этом осуществление сушки в условиях классического лесного терминала экономически нецелесообразно, что также повышает стоимость тонно-километра [7]. Помимо

этого, встаёт вопрос о необходимости доставки топлива для обеспечения энергией отдалённых лесных терминалов, которые работают на различных электрогенераторных установках. Стоимость такой энергии достаточно высока и превышает затраты при использовании сетевой электроэнергии. Не стоит забывать, что большие объёмы горюче-смазочных материалов требуют правильной организации их хранения и эксплуатации, что при нарушении норм и правил может привести к экологическим проблемам в районе функционирования лесного терминала, включая загрязнение почвы, воды и воздуха [8, 9].

Так как уборка, утилизация и хранение порубочных остатков экономически нецелесообразна, то система пользования порубочными остатками оставляет желать лучшего. Данный факт ведёт к проблеме избыточного накопления порубочных остатков, которые остаются на лесосеке и являются как причиной возникновения пожаров, так и перехода уже существующего низового пожара в гораздо более опасный верховой пожар [10-14].

В настоящий момент наиболее эффективными средствами для переработки круглого леса на лесном терминале являются высокопроизводительные системы типа «Micromill» [15]. Данная система представлена на рис. 1. Разработка отечественных аналогов оборудования для лесозаготовки и деревообработки, сравнимого с зарубежными системами, является важной задачей. Технологическая зависимость от импорта в этой области представляет риск для стратегического развития Российской Федерации [16-18]. Альтернативные системы должны быть

мобильными и компактными, чтобы обеспечивать высокую скорость монтажных работ и транспортировку в труднодоступные районы с недостаточно развитой дорожной сетью.

Главным фактором, ограничивающим повсеместное внедрение глубокой переработки круглого леса в условиях лесного терминала, является высокая энергонасыщенность применяемого оборудования, что требует значительных объёмов топлива.



Рис. 1. Мобильная лесопильная линия «Micromill»

Figure 1. Mobile sawmill line "Micromill"

Источник: Куницкая О.А., Помигуев А.В. Переработка древесины на мобильных линиях лесных терминалов // Вестник АГАТУ. – 2021. – № 3(3). – С. 82-99.

Source: Kunitskaya O.A., Pomiguyev A.V. Wood processing on mobile lines of forest terminals // Bulletin of AGATU. – 2021. – № 3(3). – Pp. 82-99.

Одним из путей частичного решения обозначенных выше задач является разработка и внедрение технологии энергетической обеспечения лесного терминала за счёт использования для генерации электроэнергии биотоплива, получаемого из порубочных остатков. Так как объём порубочных остатков колеблется от 20 до 37% [19], то энергетического потенциала будет достаточно для обеспечения всех потребностей лесного терминала за исключением транспортно-логистических работ.

Таким образом, использование лесных терминалов является одним из возможных путей решения проблем, связанных с производством пиломатериалов. Однако, необходимо тщательно оценивать все аспекты и ограничения этого подхода, чтобы до-

стичь оптимального баланса между эффективностью, экономической целесообразностью и экологической устойчивостью.

Цель данной работы: обосновать возможность обеспечения устойчивой энергетической обеспеченности для удалённых лесных терминалов за счёт использования порубочных остатков в качестве источника энергии.

### Материалы и методы

На данный момент существует несколько методов для конверсии внутренней энергии биотоплива в механическую энергию. К таковым можно отнести применение двигателей внутреннего сгорания на генераторном газе, машины, работающие по циклу Ренкина и машины, работающие по циклу Стирлинга.

В России производятся серийные газогенераторы с номинальной электрической мощностью от 30 до 330 кВт. Однако эффективность процесса преобразования биомассы в механическую энергию через газогенерацию остается невысокой, и коэффициент полезного действия составляет не более 15%. Это обусловлено в основном энергозатратами на процесс пиролиза, достигающими 10%, и потерями, связанными с выходом продуктов горения, достигающих 28,5%.

Механизмы, функционирующие в соответствии с циклом Стирлинга, представляют собой устройства с простой конструкцией, что является их основным достоинством. Их особенностями являются отсутствие систем, работающих при высоком давлении, и минимальное количество этапов подготовки рабочего тела. Однако использование этих механизмов вызывает некоторые технические сложности, связанные с необходимостью обеспечения герметичности рабочего тела из-за возможной проницаемости одноатомных газов и требованиями по компенсации утечек. Кроме того, низкий уровень готовности данной технологии к промышленному использованию [20] является базовым её недостатком.

В настоящее время есть три основных типа машин, осуществляющих работу по циклу Ренкина: поршневые паровые машины, паровые турбины и паровые винтовые машины (далее ПВМ). На данный момент поршневые паровые машины не так массово

используются и достоверные результаты их внедрения в производственную эксплуатацию отсутствуют. Хотя паровые турбины широко применяются для производства электроэнергии, высокие скорости вращения усложняют прямое использование механической энергии, что требует использования высокоскоростной механической трансмиссии.

На сегодняшний день существуют серийные паровые винтовые машины, которые демонстрируют наибольшую эффективность в диапазоне мощностей от 150 до 1500 кВт. В этом интервале мощностей КПД паровых винтовых машин превышает КПД как паропоршневых, так и паротурбинных образцов. Изображение паровой винтовой машины представлено на рис. 2.



Рисунок 2. Паровая винтовая машина

Figure 2. Steam screw machine

Источник: Маганов И.А., Тихонов Е.А.,

Сюнев В.С., Куницкая О.А. Анализ

энергетического баланса технологических цепочек предприятий лесной промышленности // Вестник АГАТУ. – 2021. – № 4(4). – С. 87-108.

Source: Maganov I.A., Tikhonov E.A., Syunev V.S.,

Kunitskaya O.A. Analysis of the energy balance of technological chains of forest industry enterprises //

Bulletin of AGATHU. – 2021. – № 4(4). – Pp. 87-108.

Одно из преимуществ таких машин – более низкое рабочее давление пара по сравнению с паротурбинными установками, а их конструкция намного проще, чем у паропоршневых машин. В связи с высоким КПД в указанном диапазоне мощностей винтовые паровые машины являются оптимальным выбором для применения в лесной промышленности.

Однако для обеспечения их работы необходимы паровые котлы, которые удовлетворяют потребностям по паропроизводительности [21].

Одним из основных ограничений применения паровых котлов является необходимость обеспечения минимальной загрузки на уровне не менее 40 % от максимальной мощности. Согласно информации, предоставленной ООО "Промышленные компоненты КАМАЗ", минимальное потребление пара ПВМ-1000 составляет 7 тонн в час, максимальное 25 тонн в час, а мощность варьируется от 150 до 970 кВт.

Важным этапом проведенного исследования является процесс подбора рубительной машины, соответствующей требованиям по производительности при определенном уровне потребления щепы для собственных нужд, колеблющемся в диапазоне от 3,5 до 12% [22].

Для распиловки круглого леса возможно применение пил, подразделяющихся по различным параметрам: круглопильные, ленточные и высокопроизводительные многопильные [23].

Обрезка сучьев и раскряжевка могут выполняться при помощи сучкорезно-раскряжевочной машины – процессора, машин с протаскивающим устройством циклического действия или стационарных аналогов [24].

Перемещение порубочных остатков, полуфабрикатов и продукции лесного терминала целесообразно осуществлять при помощи фронтальных погрузчиков различных конфигураций на базе тракторов [16, 25].

Для обеспечения транспортной влажности вывозимых пиломатериалов, возможно обеспечить их сушку непосредственно на лесном терминале при помощи сушильных камер СК-40. При этом объем сушки будет зависеть от количества получаемой топливной щепы, как и, собственно, процент распиловки круглого леса ввиду необходимости поддержания положительного энергетического баланса.

В ходе процесса сушки древесины при атмосферном давлении наблюдается уменьшение степени влажности по мере её снижения. При уменьшении начальной влажности древесины с 70 % до конечной 10 %, время, затрачиваемое на снижение влажности с 20 % до 10 %, составляет 25 % от общего времени

процесса сушки. В связи с этим, в условиях лесного терминала, где требуется достижение транспортной влажности 22% после сушки, время, указанное в таблице, сокращается до 126 часов. Точно так же удельный расход электроэнергии снижается до 30 кВт/м<sup>3</sup> [7].

Для выполнения математической модели и обоснования системы машин была разработана математическая модель, которая базируется на расчётах и анализе различных сценариев оптимизации работы лесного терминала. Для этого была использована программа MS Excel, которая позволяет учитывать входные параметры, такие как объём заготавливаемого круглого леса, расстояние плеча вывоза, процент распиловки и сушки.

Модель охватывает все этапы работы лесного терминала, начиная от подвоза круглого леса и заканчивая производством щепы из древесных отходов и сушки пиломатериалов. Она позволяет проводить анализ оптимальных стратегий по использованию машин и оборудования для выполнения всех технологических операций на лесном терминале. Применение данной системы позволяет оптимизировать распределение времени выполнения технологических операций по времени смены.

### Результаты

Проведем анализ работы модели на конкретном примере. Для этого внесём параметры в ячейки "Значение", которые будут рассмотрены в контексте работоспособности лесного терминала. В данном случае рассматривается технология заготовки деревьев сосны на расстоянии 300 м. от лесосеки до лесного терминала в летний период. Объём заготавливаемого круглого леса составляет 200 м<sup>3</sup> за смену, при этом весь круглый лес будет перерабатываться на лесном терминале в пиломатериалы, которые затем высушиваются до транспортной влажности 20%. Средний объём хлыста равен 0,4 м<sup>3</sup>, его длина составляет 25 метров, а средняя длина выпиленных сортиментов – 6 метров. Потребление щепы рубительной машиной на собственные нужды равняется 3,5%. Доля лесосечных отходов составляет 37%.

В модели используется 3 уровня эффективности и 3 уровня количества порубочных остатков.

Эти уровни подразделяются на:

- минимальный (min);

- средний (av);
- максимальный (max).

Уровни эффективности модели применяются к разделам расчёта применяемых машин и оборудования на стадии обрезки сучьев и раскряжёвки, и при определении количества щепы.

В первом случае разделение идёт по принципу благоприятных условий работ для машин и оборудования и эффективности их использования. К данным параметрам можно отнести коэффициент использования рабочего времени, КПД трансмиссии, коэффициент сцепления трактора с грунтом и аналогичные показатели.

Во втором случае уровень количества порубочных остатков зависит от бонитета леса и, соответственно, количества получаемой щепы. Чем выше бонитет леса, тем меньше порубочных остатков, так как выше выход деловой древесины, меньше её пороков и дефектов, следовательно, количество порубочных остатков минимально, и, наоборот, при низком бонитете оптимистичность модели максимальна.

Входные параметры представлены в табл. 1.

После ввода входных данных автоматически проводится процесс вычисления.

Упрощённая блок-схема данного расчёта представлена на рис. 3.

Процесс расчёта системы машин при помощи блок-схемы следующий: сначала вводятся входные параметры и выбирается оборудование, в частности ПВМ. Исходя из этого, выполняется расчёт оборудования, в первую очередь применяемых паровых котлов, после чего проводится проверка полученных значений по ограничениям, связанным со спецификой применяемых котлов и ПВМ.

Производительность ПВМ всегда должна быть выше своей минимальной мощности для обеспечения работы лесного терминала, следовательно, всегда должно поступать определённое количество пара. Для ПВМ-1000 эта величина составляет 7 тонн в час. Если условие удовлетворяется, то принимается номинальный расход пара. В случае, если по расчётам оборудование не отличается высокой энергонасыщенностью или потребность в электричестве невысокая, то и производительность паровых кот-

лов низкая, но, она должна быть не меньше минимальной для обеспечения работы лесного терминала, поэтому при расчётном потреблении пара ниже необходимого, мы принимаем всё равно минимально необходимую производительность для обеспечения работы лесного терминала.

Следующей проверкой является ограничение по паровым котлам. Паровые котлы марки КЕ, которые рекомендованы к использованию самими разработчиками ПВМ не могут работать при загрузке менее 40%. Таким образом, если загрузка менее 40%, то принимается 40%, если более, то принимается номинальная. В случае принятия минимального значения необходимо вновь провести расчёт ПВМ на удовлетворение условию. Так как при производительности парогенератора на минимальную производительность пара для ПВМ, загрузка парогенератора может быть меньше 40%, поэтому при принятии 40%

повысится и производительность и нужно принять новое значение.

При удовлетворении всех условий следующей проверкой является проверка баланса щепы. Для начала работы лесного терминала необходимо обеспечить ему первоначальный суточный её запас. В случае, если в конце рабочих суток количество произведённой щепы больше количества затраченной на генерацию энергии, то баланс положительный. Если нет, то баланс щепы отрицательный и необходимо внести корректировки при вводе переменных, процента распиловки, сушки, других параметров и заново пройти весь цикл.

В результате расчёта полученные значения отображаются в соответствующих ячейках выходных параметров, представленных в табл. 2. Помимо этого, предоставляется список используемого оборудования и машин, который приведен в табл. 3.

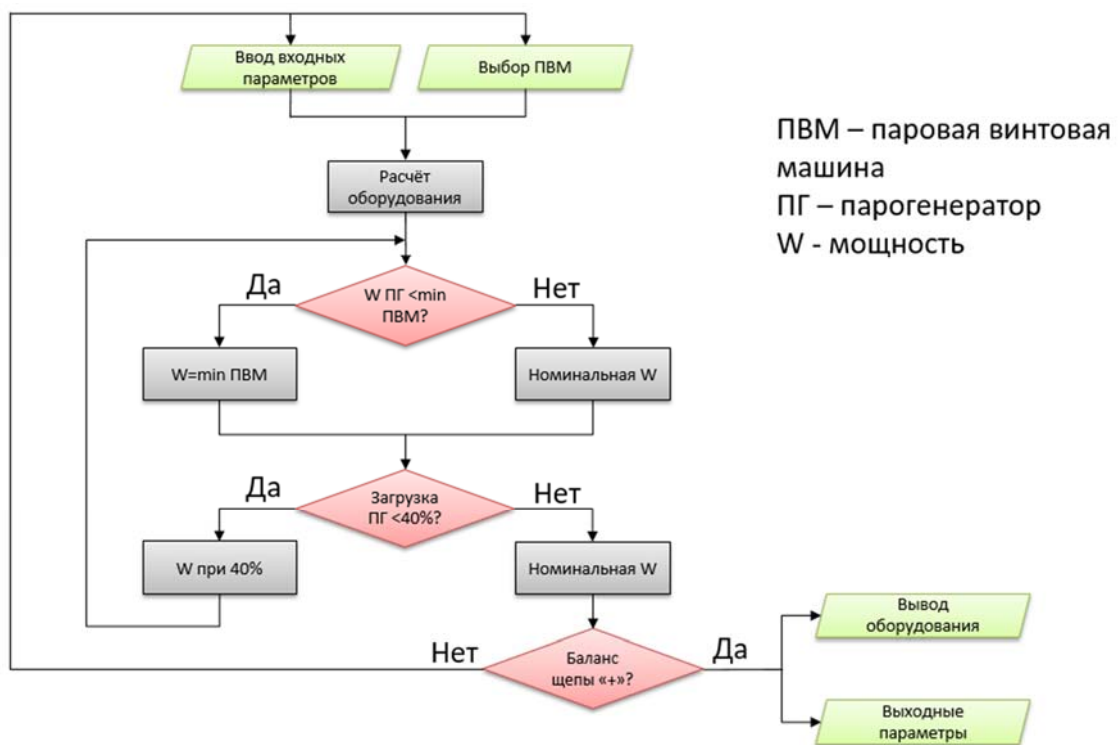


Рисунок 3. Упрощённая блок-схема расчёта системы машин  
 Figure 3. Simplified flowchart for calculating the machine system

Источник: собственная композиция авторов  
 Source: author's composition

Таблица 1

Входные параметры

Table 1

*Input parameters*

	Параметр входной   Input parameter	Единицы измерения   Units of measurement	Значение   Meaning
1	Уровень эффективности модели   The level of effectiveness of the model	-	max
2	Количество порубочных остатков   Number of felling residues	-	max
3	Способ вывозки   The method of removal	-	Деревья с кроной   Trees with a crown
4	Порода древесины   The type of wood	-	Сосна   Pine tree
5	Расстояние трелёвки   Skidding distance	м	300
6	Объём круглого леса   The volume of the roundwood	м <sup>3</sup> /смена	200
7	Процент распиловки   The percentage of sawing	%	100
8	Процент сушки от распиловки   The percentage of drying from sawing	%	100
9	Объём хлыста   Whip Volume	м <sup>3</sup>	0,4
10	Средняя длина хлыста   The average length of the whip	м	25
11	Средняя длина выпиленных сортиментов   The average length of the cuttings	м	6
12	Сезонность   Seasonality	-	Лето
13	Потребление щепы рубительной машиной   Consumption of wood chips by the chopping machine	%	3,5

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 2

Выходные параметры

Table 2

*Output parameters*

	Параметр выходной   Output parameter	Единицы измерения   Units of measurement	Значение   Meaning	Статус   Status
1	Объём производимой щепы   The volume of wood chips produced	кг/смена	75174,60	
2	Объём потребляемой щепы   The amount of wood chips consumed	кг/смена	107636,83	
3	Производительность парогенератора минимальная   The steam generator's performance is minimal	т/ч	7,00	
4	Пиковая нагрузка   Peak load	кВт	414,00	
5	Загрузка парогенератора минимальная   The steam generator load is minimal	%	58,33	



	Параметр выходной   Output parameter	Единицы измерения   Units of measurement	Значение   Meaning	Статус   Status
6	Загрузка парогенератора максимальная   Maximum steam generator load	%	93,34	
7	Время работы рубительной машины   Operating time of the chopping machine	ч	8,04	
8	Время работы пил   Working hours of the saw	ч	4,2	

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: own calculations

Таблица 3

Используемое основное оборудование лесного терминала

Table 3

The main equipment of the forest terminal used

	Вид   View	Тип   Type	Наименование   Name	Количество, шт.   Quantity, pcs
1	Парогенератор   Steam generator	-	KE-4-14-O	3
2	Рубительная машина   Chopping machine	-	SKORPION 650 EB	1
3	Лесопильное оборудование   Sawmill equipment	Многопильный станок   Multi-saw machine	Micromill	1
4	Сучкорезная машина   The knot-cutting machine	Стационарная   Stationary	Linhai LH-300	1
5	Раскряжёвочная машина   Bucking Machine	Стационарная   Stationary	ЛО-15	1

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: own calculations

На основании данных, представленных в табл. 2, можно заключить, что лесной терминал не способен функционировать при заданных условиях. Производимый объём щепы существенно меньше объёма щепы, требуемого для генерации требуемой электрической мощности работы лесного терминала. Красный цвет в столбце «Статус» напротив соответствующих строчек в таблице как раз сигнализирует о данном недостатке.

Итерационным методом проведен поиск для определения минимального объёма круглого леса, который должен быть заготовлен за смену, чтобы лесной терминал мог работать с максимальной загрузкой пильного оборудования и максимальной процентной долей сухих готовых пиломатериалов при равных условиях. Обновлённые входные данные представлены в табл. 4, а выходные – в табл. 5. Помимо этого, предоставляется обновлённый список используемого оборудования и машин, который приведен в табл. 3.

В результате проведенных расчётов были внесены изменения во входные параметры процесса по заготовке круглого леса и производству пиломатериалов.

Зелёный цвет графы статус показывает, что все необходимые условия выполнены:

- баланс щепы между производимой и потребляемой щепой для обеспечения работы лесного терминала положительный;
- подобранный парогенератор позволяет обеспечить работу паровой винтовой машины в необходимом диапазоне;
- минимальная загрузка парогенератора удовлетворяет условию в минимальном значении 40 %;
- максимальная загрузка парогенератора также находится в пределах нормы.

Таким образом, для обеспечения работоспособности лесного терминала необходим минимальный объём заготовки круглого леса, равный 274 м<sup>3</sup> в смену. В связи с тем, что весь объём заготовки будет

перерабатываться в пиломатериалы, представляется возможным высушить до транспортной влажности лишь 26% от общего объёма произведенных пиломатериалов. Для выполнения указанных процессов потребуется применение специализированного оборудования, которое представлено в табл. 3.

Исходя из результатов исследования, был построен график зависимости потребления электроэнергии от используемого оборудования в течение рабочих суток. Графическое представление данной зависимости приведено на рис. 4.

Для визуализации расхода щепы за смену на рис. 5 представлен соответствующий график. Далее РМ – рубительная машина, ПГ – парогенератор.

Для визуализации загрузки парогенератора на рис. 6 представлен соответствующий график. Загрузка парогенератора не должна быть ниже 40 %.

Как видно из графика, наибольший пик потребления электроэнергии приходится на производство пиломатериалов, так как используется высокоэффективное и энергонасыщенное оборудование в

момент пересечения выполнения данной операции, при пересечении работами по производству щепы. Соответственно в данном случае наиболее благоприятно максимально разносить все технологические операции по времени, чтобы уменьшить пиковую нагрузку.

Так как сушка растянута во времени и электропотребление при этом постоянно, то на графике энергозатраты на неё представлены в виде линии на протяжении всего времени работы.

Ввиду того, что для работы лесного терминала необходим начальный суточный запас щепы, то мы можем перемещать начало времени процесса производства щепы наиболее благоприятным образом, чтобы обеспечить положительный баланс щепы в любой момент времени работы лесного терминала и не увеличивать при этом пиковую энергетическую нагрузку за счёт разнесения выполняемых процессов во времени.

Обновлённые входные параметры

Таблица 4

Table 4

Updated input parameters

	Параметр входной   Input parameter	Единицы измерения   Units of measurement	Значение   Meaning
1	Уровень эффективности модели   The level of effectiveness of the model	-	max
2	Количество порубочных остатков   Number of felling residues	-	max
3	Способ вывозки   The method of removal	-	Деревья с кроной   Trees with a crown
4	Порода древесины   The type of wood	-	Сосна   Pine tree
5	Расстояние трелёвки   Skidding distance	м	300
6	Объём круглого леса   The volume of the roundwood	м <sup>3</sup> /смена	274
7	Процент распиловки   The percentage of sawing	%	100
8	Процент сушки от распиловки   The percentage of drying from sawing	%	26
9	Объём хлыста   Whip Volume	м <sup>3</sup>	0,4
10	Средняя длина хлыста   The average length of the whip	м	25
11	Средняя длина выпиленных сортиментов   The average length of the cuttings	м	6
12	Сезонность   Seasonality	-	Лето
13	Потребление щепы рубительной машиной   Consumption of wood chips by the chopping machine	%	3,5

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 5

Обновлённые выходные параметры

Table 5

Updated output parameters

	Параметр выходной   Output parameter	Единицы измерения   Units of measurement	Значение   Meaning	Статус   Status
1	Объём производимой щепы   The volume of wood chips produced	кг/смена	102989,21	
2	Объём потребляемой щепы   The amount of wood chips consumed	кг/смена	102069,71	
3	Производительность парогенератора минимальная   The steam generator's performance is minimal	т/ч	7,00	
4	Пиковая нагрузка   Peak load	кВт	440,25	
5	Загрузка парогенератора минимальная   The steam generator load is minimal	%	58,33	
6	Загрузка парогенератора максимальная   Maximum steam generator load	%	96,80	
7	Время работы рубительной машины   Operating time of the chopping machine	ч	11,01	
8	Время работы пил   Working hours of the saw	ч	5,7	

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 6

Обновлённое используемое основное оборудование лесного терминала

Table 6

Updated used main equipment of the forest terminal

	Вид   View	Тип   Type	Наименование   Name	Количество, шт.   Quantity, pcs
1	Парогенератор   Steam generator		KE-4-14-O	3
2	Рубительная машина   Chopping machine		SKORPION 650 EB	1
3	Лесопильное оборудование   Sawmill equipment	Многопильный станок   Multi-saw machine	Micromill	1
4	Сучкорезная машина   The knot-cutting machine	Стационарная   Stationary	Linhai LH-300	1
5	Раскряжёвочная машина   Bucking Machine	Стационарная   Stationary	ЛО-15	1

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

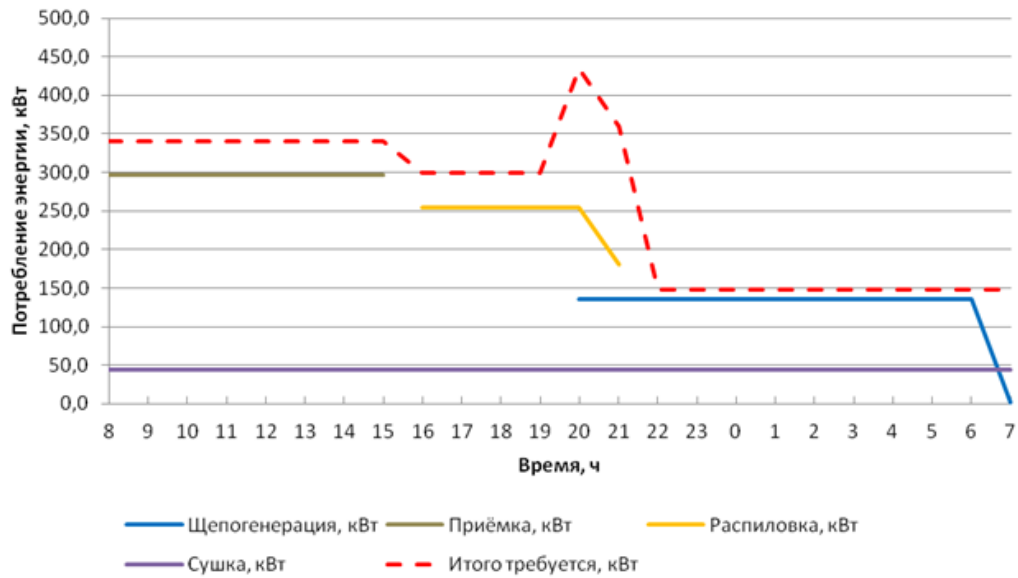


Рисунок 4. График потребления электроэнергии

Figure 4. Graph of electricity consumption

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

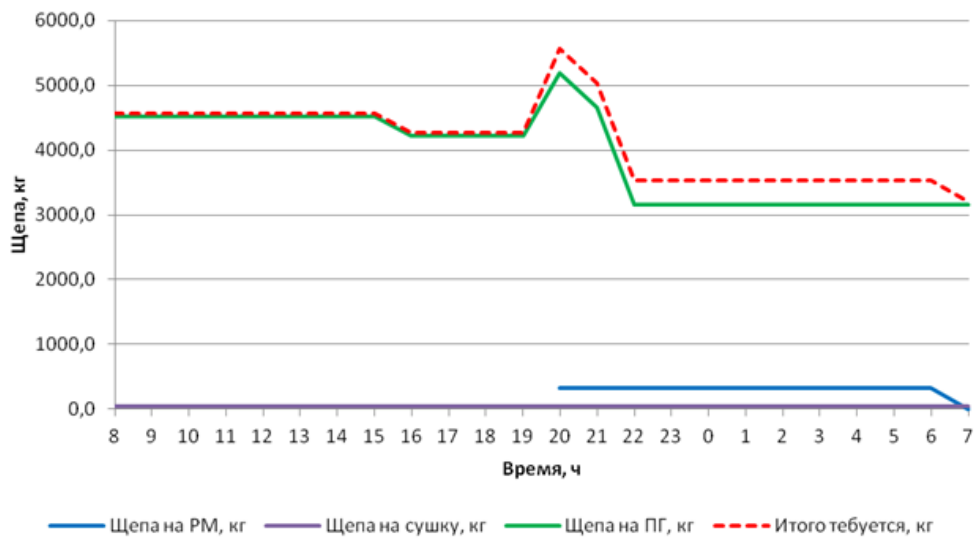


Рисунок 5. График расхода щепы на лесном терминале

Figure 5. The graph of the consumption of wood chips at the forest terminal

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

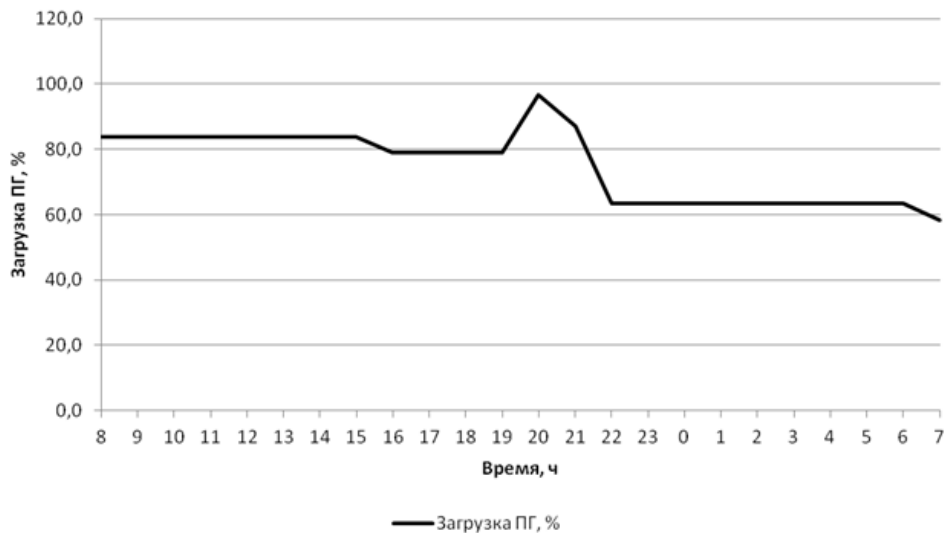


Рисунок 6. График загрузки парогенератора  
Figure 6. Steam generator loading schedule

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

#### Обсуждение

Выполненные исследования показали теоретическую возможность достижения положительного энергетического баланса при использовании биотоплива, полученного из порубочных остатков с применением в качестве энергетической установки паровой винтовой машины ПВМ-1000. Технология энергообеспечения лесного терминала за счёт сжигания топливной щепы является перспективной к внедрению при заготовке круглого леса деревьями не менее чем в объёме 274 м<sup>3</sup> в смену при полной переработке его в пиломатериалы. Суммарный расход топлива при работе лесного терминала равен 0, так как мы используем технику и оборудование, работающую на ископаемом топливе только для осуществления транспортно-логистических работ, а для непосредственной глубокой переработки круглого леса стационарную технику и оборудование, работающие от электроэнергии, которую вырабатывает паровая винтовая машина за счёт сжигания щепы в топке парогенератора соответствующей мощности.

При увеличении объёма заготовки возможно увеличение процента сушки вплоть до выхода на стопроцентное производство пиломатериалов транспортной влажности. С другой стороны, при меньших объёмах заготовки существует возможность организации частичной глубокой перера-

ботки. Допускается варьирование процента производства пиломатериалов естественной влажности или производства меньшего количества пиломатериалов, но с полной сушкой до транспортировочной влажности.

Стоит отметить, что на лесных терминалах с небольшим объёмом заготавливаемого круглого леса использование энергонасыщенного оборудования, к примеру, многопильных станков «Micromill» избыточно и их применение будет неоправданно ввиду большого потребления щепы для электрогенерации. Поэтому в таких случаях целесообразнее эксплуатация современных угловых круглопильных станков, таких, к примеру, как Барс-5.

#### Заключение

Основным ограничением работы лесного терминала при минимальном объёме заготовки круглого леса является количество производимой щепы для её положительного баланса.

Важным замечанием является отсутствие отечественных аналогов энергонасыщенных многопильных станков типа «Micromill», отличающихся высокой производительностью, что вызывает необходимость в соответствующих разработках для возможности импортозамещения в современных условиях.

Для более детальной проработки вопроса необходимо дальнейшее изучение технических и технологических вопросов монтажа, эксплуатации и

транспортировки оборудования. В особенности это относится к парогенераторам, которые имеют особые условия применения. Решение данных вопросов

позволит провести экономическое обоснование внедрения технологии, капитальных и операционных затрат.

### Список литературы

1. Развитие циркулярной экономики в России: рынок биотоплива / А. А. Тамби, С. С. Морковина, И. В. Григорьев, В. И. Григорьев // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9, № 4(36). С. 173-185. DOI 10.34220/issn.2222-7962/2019.4/19. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/utxeil>.
2. Григорьев И.В., Зорин М.В. Современный программный комплекс для повышения безопасности, надёжности и энергоэффективности автолесовозов // Вестник АГАТУ. 2021. № 4 (4). С. 65-72.
3. Григорьев И.В. Перевозка лесоматериалов по железной дороге // Потенциал науки и образования: современные исследования в области агрономии, землеустройства, лесного хозяйства. 2019. С. 5-9.
4. Злобина Н.И., Зеликов В.А., Григорьева О.И., Новгородов Д.В. Обоснование пропускной способности по критерию безопасности дорожного движения на лесовозных автомобильных дорогах // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 4. С. 19-35.
5. Злобина Н.И., Зеликов В.А., Григорьева О.И., Гурьев А.Ю. Определение пропускной способности лесовозных автомобильных дорог эмпирическим путем с учетом безопасности дорожного движения // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 5. С. 38-65.
6. Куницкая О.А., Помигуев А.В. Функциональные возможности и эксплуатационные характеристики средств энергоснабжения лесных терминалов // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Седьмой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием, Петрозаводск, 25 мая 2021 года. – Петрозаводск: Петрозаводский государственный университет, 2021. – С. 102-103.
7. Тихонов Е.А. Научные основы обеспечения энергетической устойчивости технологических процессов лесозаготовительных производств на основе использования лесосечных отходов: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. – Петрозаводск : Петрозаводский государственный университет, 2022. – 36 с.
8. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Мотовилов А.И., Серяков С.А. Оценка мероприятий, направленных на улучшение условий труда персонала на лесосечных и лесохозяйственных работах // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 6. С. 51-60.
9. 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. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 255-летию Землеустройству Якутии и Году науки и технологий. Якутск, 2021. С. 271-278.
10. Лоренц А.С., Григорьев И.В., Григорьева О.И., Рябухин П.Б. Исследование применения иглофильтров в составе вакуумных установок для повышения эффективности борьбы с лесными пожарами // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 4 (60). С. 124-129.
11. Гринько О.И., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Влияние лесных пожаров на лесную экосистему // Вестник АГАТУ. 2023. № 3 (11). С. 45-72.
12. Григорьева О.И., Гринько О.И., Николаева Ф.В. Весенний отжиг для снижения пожароопасности лесов // Повышение эффективности лесного комплекса. Материалы Восьмой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием. Петрозаводск, 2022. С. 54-55.
13. Григорьева О.И., Гринько О.И., Григорьев И.В., Калита Е.Г., Тихонов Е.А. Прогнозная модель послепожарного лесовосстановления в Иркутской области // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13. № 1 (49). С. 85-98.

14. Терновская О.В., Платонов А.А. Моделирование классификационных признаков лесных граблей // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11. № 3 (43). С. 172-182.
15. Куницкая О.А., Помигуев А.В. Переработка древесины на мобильных линиях лесных терминалов // Вестник АГАТУ. – 2021. – № 3(3). – С. 82-99.
16. 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 Всероссийской научно-практической конференции ; под ред. Ю.М. Казакова [и др.]. Казань, 2023. С. 48-51.
17. Григорьев И.В. Современные проблемы импортозамещения в лесном машиностроении Российской Федерации // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития. Материалы Всероссийской научно-практической конференции / отв. ред. Ю.А. Безруких, Е.В. Мельникова. Красноярск, 2022. С. 165-169.
18. Григорьева О.И., Макуев В.А., Барышникова Е.В., Бурмистрова О.Н., Швецова В.В., Григорьев И.В., Иванов В.А. Перспективы импортозамещения систем машин для искусственного лесовосстановления // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3 (55). С. 78-84.
19. Трушевский П.В., Куницкая О.А., Должиков И.С., Макуев В.А., Ревяко С.И., Григорьева О.И. Анализ технических и технологических решений очистки лесосек от порубочных остатков // Resources and Technology. 2023. Т. 20. № 4. С. 89-138.
20. Fernando Bruno Dovichi Filho, York Castillo Santiago, Electo Eduardo Silva Lora [et al.] Evaluation of the maturity level of biomass electricity generation technologies using the technology readiness level criteria // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 295. – P. 786–791.
21. Маганов И.А., Тихонов Е.А., Сюнев В.С., Куницкая О.А. Анализ энергетического баланса технологических цепочек предприятий лесной промышленности // Вестник АГАТУ. 2021. № 4(4). С. 87-108.
22. Анисимов П.Н., Онучин Е.М. Моделирование работы системы энергообеспечения мобильных технологических линий по производству сухой топливной щепы с использованием части производимого биогенного топлива // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 89. С. 518- 530.
23. Тамби А.А., Григорьев И.В., Куницкая О.А. Обоснование необходимости внедрения процессов промышленного лесопиления в структуру лесозаготовительной отрасли // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2017. № 6 (360). С. 76-88.
24. Григорьев И.В., Куницкая О.А., Давтян А.Б. Современное технологическое оборудование валочных и харвестерных машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 7. С. 9-16.
25. Чураков А.А., Григорьев И.В., Должиков И.С., Григорьева О.И., Тихонов Е.А., Ревяко С.И. Вездеходный адаптер на базе мотоблока для различных лесных работ // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 2 (58). С. 113-120.

### References

1. Development of the circular economy in Russia: biofuel market / A. A. Tambi, S. S. Morkovina, I. V. Grigoriev, V. I. Grigoriev // Forestry engineering journal. 2019. Vol. 9, No. 4(36). pp. 173-185. DOI <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.4/19>.
2. Grigorev I.V., Zorin M.V. Modern software package for improving the safety, reliability and energy efficiency of log-ging trucks // Bulletin of AGATU. 2021. No. 4 (4). pp. 65-72.
3. Grigorev I.V. Transportation of timber by rail // Potential of science and education: modern research in the field of agronomy, land management, forestry. 2019. pp. 5-9.
4. Zlobina N.I., Zelikov V.A., Grigoreva O.I., Novgorodov D.V. Justification of throughput capacity according to the criterion of road safety on logging roads // Safety and labor protection in logging and woodworking industries. 2022. No. 4. pp. 19-35.

5. Zlobina N.I., Zelikov V.A., Grigoreva O.I., Guryev A.Yu. Determination of the capacity of logging roads empirically taking into account road safety // Occupational safety and health in logging and woodworking industries. 2022. No. 5. pp. 38-65.

6. Kunitskaya O.A., Pomiguyev A.V. Functional capabilities and operational characteristics of power supply facilities for forest terminals // Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the Seventh All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation, Petrozavodsk, May 25, 2021. Petrozavodsk: Petrozavodsk State University, 2021. pp. 102-103.

7. Tikhonov E.A. Scientific foundations of ensuring the energy stability of technological processes of logging industries based on the use of logging waste: abstract of the dissertation of the Doctor of technical Sciences. Petrozavodsk: Petrozavodsk State University, 2022. 36 p.

8. Grigorev I.V., Grigoreva O.I., Motovilov A.I., Seryakov S.A. Assessment of measures aimed at improving the working conditions of personnel at logging and forestry operations // Safety and labor protection in logging and woodworking industries. 2022. No. 6. pp. 51-60.

9. 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.

10. Lorenz A.S., Grigorev I.V., Grigoreva O.I., Ryabukhin P.B. Investigation of the use of needle filters as part of vacuum installations to increase the effectiveness of fighting forest fires // Systems. Methods. Technologies. 2023. No. 4 (60). pp. 124-129.

11. Grinko O.I., Grigoreva O.I., Grigorev I.V. The impact of forest fires on the forest ecosystem // Herald of AGATHU. 2023. No. 3 (11). pp. 45-72.

12. Grigoreva O.I., Grinko O.I., Nikolaeva F.V. Spring annealing to reduce the fire hazard of forests // Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Eighth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation. Petrozavodsk, 2022. pp. 54-55.

13. Grigoreva O.I., Grinko O.I., Grigorev I.V., Kalita E.G., Tikhonov E.A. Predictive model of post-fire reforestation in the Irkutsk region // Forestry journal. 2023. Vol. 13. No. 1 (49). pp. 85-98.

14. Ternovskaya O.V., Platonov A.A. Modeling of classification features of forest rakes // Forestry journal. 2021. Vol. 11. No. 3 (43). pp. 172-182.

15. Kunitskaya O.A., Pomiguyev A.V. Wood processing on mobile lines of forest terminals // Bulletin of AGATU. – 2021. – № 3(3). – Pp. 82-99.

16. 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. Edited by Yu.M. Kazakov [et al.]. Kazan, 2023. pp. 48-51.

17. 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. Editors Yu.A. Bezrukikh, E.V. Melnikova. Krasnoyarsk, 2022. pp. 165-169.

18. 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 // The system. Methods. Technologies. 2022. No. 3 (55). pp. 78-84.

19. Trushevsky P.V., Kunitskaya O.A., Dolzhikov I.S., Makuyev V.A., Revyako S.I., Grigoreva O.I. Analysis of technical and technological solutions for clearing cutting areas from felling residues // Resources and Technology. 2023. Vol. 20. No. 4. pp. 89-138.



20. Fernando Bruno Dovichi Filho, York Castillo Santiago, Electo Eduardo Silva Lora [et al.] Evaluation of the maturity level of biomass electricity generation technologies using the technology readiness level criteria // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 295. P. 786-791.

21. Maganov I.A., Tikhonov E.A., Syuney V.S., Kunitskaya O.A. Analysis of the energy balance of technological chains of forest industry enterprises // Bulletin of AGATHU. 2021. № 4(4). Pp. 87-108.

22. Anisimov P.N., Onuchin E.M. Modeling of the operation of the energy supply system of mobile technological lines for the production of dry fuel chips using a part of the produced biogenic fuel // Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. 2013. No. 89. pp. 518-530.

23. Tambi A.A., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A. Substantiation of the need to introduce industrial sawmilling processes into the structure of the logging industry // Izvestia of higher educational institutions. Forest magazine. 2017. No. 6 (360). pp. 76-88.

24. Grigoriev 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.

25. Churakov A.A., Grigorev I.V., Dolzhikov I.S., Grigoreva O.I., Tikhonov E.A., Revyako S.I. All-terrain adapter based on a tillerblock for various forest operations // Systems. Methods. Technologies. 2023. No. 2 (58). pp. 113-120.

### Сведения об авторах

*Маганов Иван Александрович* – аспирант института лесных, горных и строительных наук ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9156-4984>, e-mail: [magavan17@mail.ru](mailto:magavan17@mail.ru).

*Тихонов Евгений Андреевич* – доктор технических наук, профессор института лесных, горных и строительных наук ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: [tihonov@petsu.ru](mailto:tihonov@petsu.ru).

*Петруша Сергей Витальевич* – аспирант института лесных, горных и строительных наук ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0879-6499>, e-mail: [ros-nano@yandex.ru](mailto:ros-nano@yandex.ru).

*Трушевский Павел Владимирович* – директор ООО «Сибирский биоуголь», г. Калуга, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5639-5492>, e-mail: [p.trushevskii@coal.bio](mailto:p.trushevskii@coal.bio).

✉ *Морковин Владимир Александрович* – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>, e-mail: [morkovin-vladimir@mail.ru](mailto:morkovin-vladimir@mail.ru).

*Куницкая Ольга Анатольевна* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», г. Якутск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, e-mail: [ola.ola07@mail.ru](mailto:ola.ola07@mail.ru).

### Information about the authors

*Ivan A. Maganov* – Postgraduate student of the Institute of Forestry, Mining and Construction Sciences, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9156-4984>, e-mail: [magavan17@mail.ru](mailto:magavan17@mail.ru).

*Evgeny A. Tikhonov* – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Institute of Forestry, Mining and Construction Sciences, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: [tihonov@petsu.ru](mailto:tihonov@petsu.ru).

*Sergey V. Petrusha* – Postgraduate student of the Institute of Forestry, Mining and Construction Sciences, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0879-6499>, e-mail: [ros-nano@yandex.ru](mailto:ros-nano@yandex.ru).

*Pavel V. Trushevsky* – Director of Siberian Biougol LLC, Kaluga, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5639-5492>, e-mail: [p.trushevskii@coal.bio](mailto:p.trushevskii@coal.bio).

✉ *Vladimir A. Morkovin* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, Voronezh, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>, e-mail: [morkovin-vladimir@mail.ru](mailto:morkovin-vladimir@mail.ru).

*Olga A. Kunitskaya* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology and Equipment of the Forest Complex of the Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, e-mail: [ola.ola07@mail.ru](mailto:ola.ola07@mail.ru).

✉ Для контактов | Corresponding author