

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/11>

УДК 630*387.3:621.14.048



Экспериментальная верификация теоретической модели функционирования паровой винтовой машины ПВМ-200 для энергообеспечения лесных терминалов

Сергей В. Петруша¹, ros-nano@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-0879-6499>

Евгений А. Тихонов¹, tihonov@petrsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

Владимир А. Морковин², morkovin-vladimir@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>

Ольга А. Куницкая³, ola.ola07@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

Павел Н. Перфильев⁴, p.perfilev@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>

Сергей И. Ревяко⁵, revyako77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>

¹ ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, 185035, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, 677007, Российская Федерация

⁴ ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация

⁵ Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова - филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», ул. Пушкинская, д. 111, г. Новочеркасск, 346428, Российская Федерация

В статье представлены результаты комплексных экспериментальных стендовых исследований паровой винтовой машины ПВМ-200, рассматриваемой в качестве ключевого компонента автономной энергоустановки для удалённых лесных терминалов. Создание таких терминалов, предназначенных для глубокой переработки древесины непосредственно в местах её заготовки, является актуальной задачей в контексте освоения ресурсов северных и арктических регионов Российской Федерации, характеризующихся слаборазвитой энергетической и транспортной инфраструктурой. Целью работы являлась верификация теоретической линейной модели зависимости мощности от расхода пара путем установления и анализа реальной зависимости мощности от расхода пара. Стендовые испытания ПВМ-200 проводились в условиях, приближенных к промышленной эксплуатации, на пяти фиксированных режимах, равномерно охватывающих рабочий диапазон входного давления пара. На основе массива натуральных данных методом наименьших квадратов получена уточнённая аппроксимирующая зависимость в виде степенной функции. Статистический анализ согласия новой эмпирической модели с исходной теоретической выполнен с использованием критерия Пирсона (χ^2). Результаты анализа показали статистически значимое расхождение между моделями: теоретические значения мощности не попадают в доверительные интервалы экспериментальных данных. Это свидетельствует о недостаточной точности первоначальной линейной модели, обусловленной неучтёнными механическими и тепловыми потерями. Установленная в ходе испытаний степенная зависимость обладает высокой степенью достоверности с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,98$ и может быть использована в будущем для разработки усовершенствованной математической модели независимой энергетической системы лесного терминала, что повысит точность расчётов её энергообеспечения и общую эффективность.

Ключевые слова: лесной терминал, биотопливо, паровая винтовая машина, энергетическая устойчивость, статистический анализ, математическая модель, экспериментальная верификация

Финансирование: материалы исследования получены за счет 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: Экспериментальная верификация теоретической модели функционирования паровой винтовой машины ПВМ-200 для энергообеспечения лесных терминалов / С. В. Петруша, Е. А. Тихонов, В. А. Морковин, О. А. Куницкая, П. Н. Перфильев, С. И. Ревяко // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 160–173. – Библиогр.: с. 169–172 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/11>.



Поступила 14.04.2025. *Пересмотрена* 21.01.2026. *Принята* 15.03.2026. *Опубликована онлайн* 27.03.2026.


Article

Experimental verification of the theoretical model of operation of the PVM-200 steam screw expander machine for power supply of forest terminals

Sergey V. Petrusha¹, ros-nano@yandex.ru,  <https://orcid.org/0009-0002-0879-6499>

Evgeny A. Tikhonov¹, tikhonov@petsu.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

Vladimir A. Morkovin²,  morkovin-vladimir@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>

Olga A. Kunitskaya³, ola.ola07@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

Pavel N. Perfiliev⁴, p.perfilev@narfu.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>

Sergey I. Revyako⁵, revyako77@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>

¹ Petrozavodsk State University, 33 Lenin Ave., Petrozavodsk, Russian Federation

² Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Timiryazev str., 8, Russian Federation

³ Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, Sergelyakhskoye Highway, 3 km, 3, Russian Federation

⁴ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

⁵ Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov is a branch of the Don State Agrarian University, 111 Pushkinskaya str., Novocherkassk, Russian Federation

Abstract

The article presents the results of comprehensive experimental bench studies of the SSM-200 steam screw machine, considered as a key component of an autonomous power plant for remote forest terminals. The creation of such terminals, designed for deep processing of wood directly at its production sites, is an urgent task in the context of developing the resources of the northern and Arctic regions of the Russian Federation, characterized by poorly developed energy and transport infrastructure. The purpose of the work is to verify the theoretical linear model of power dependence on steam flow by establishing and analyzing the real power dependence on steam flow. The SSM-200 bench tests were conducted under conditions close to industrial operation, at five fixed modes, uniformly covering the working range of the incoming steam pressure. Based on the natural data array, a refined approximating dependence in the form of a power function was obtained using the least squares method. Statistical analysis of the agreement of the new empirical model with the original theoretical model was performed using Pearson's criterion (χ^2). The analysis results showed a statistically significant discrepancy between the models: theoretical power values do not fall within the confidence intervals of the experimental data. This indicates insufficient accuracy of the initial linear model due to unaccounted for mechanical and thermal losses. The degree dependence established during the tests has a high degree of reliability with a determination coefficient of $R^2 = 0.98$ and can be used in the future to develop an improved mathematical model of an independent energy system of a forest terminal, which will increase the accuracy of its energy supply calculations and overall efficiency.

Keywords: forest terminal, biofuel, steam screw machine, energy stability, statistical analysis, mathematical model, experimental verification

Funding: 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: Petrusha S. V., Tikhonov E. A., Morkovin V. A., Kunitskaya O. A., Perfiliev P. N., Revyako S. I. (2026). Experimental verification of the theoretical model of operation of the PVM-200 steam screw expander machine for power supply of forest terminals. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 160–173 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/11>.

Received 14.04.2025.

Revised 21.01.2026.

Accepted 15.03.2026.

Published online 27.03.2026.

Введение

Актуальность исследований в области автономной энергетики на древесных отходах обусловлена необходимостью энергообеспечения удалённых лесозаготовительных терминалов, стремлением к снижению углеродного следа и максимальному использованию местных ресурсов [1-3].

Фундаментальные исследования подтверждают экологическую и операционную выгоду перехода на древесное топливо. Мехренцев и Корж [4] подчёркивают, что использование нормированного древесного топлива (щепы, пеллеты) обеспечивает низкие выбросы CO₂ и повышает энергоэффективность лесопромышленного производства. Ключевыми организационными решениями они видят создание топливно-технологических терминалов, что позволяет оптимизировать логистику и вовлекать в оборот низкосортную древесину.

Экономический анализ, представленный Марченко и Соломиным [5,6], демонстрирует конкурентоспособность газогенераторных электростанций (ГГЭС) на древесном топливе. Их расчёты показывают, что мини-ТЭЦ на щепе становятся эффективнее дизельных электростанций, а при введении платы за выбросы CO₂ могут конкурировать и с установками на угле и газе.

Эти выводы методологически опираются на ряд работ по оценке ресурсов и эффективности возобновляемых источников энергии в России [7-9]. Конкурентоспособность напрямую зависит от оптимизации всей логистической цепочки топливообеспечения, где критически важен выбор техники и минимизация транспортных затрат [10,11].

Исследования в области технологий газификации биомассы для автономных объектов развиваются от концептуального анализа к детальному проектированию. Куницкая и соавт. [12] провели комплексный обзор газогенерирующих систем, сравнив различные типы реакторов (с плотным, псевдооживленным слоем, с увлечённым потоком) и обосновав выбор установок малой мощности (1–10 МВт) для лесных терминалов. Они отмечают, что стоимость энергии от таких установок может быть в 15 раз ниже, чем при использовании дизельного топлива.

Это направление получило развитие в работах Анисимова и коллектива, которые сфокусировались на создании высокоэффективных гибридных установок мегаваттного класса. В их исследованиях представлена эволюция от имитационного моделирования схемы, сочетающей газовую турбину (ГТУ) на генераторном газе и

турбину органического цикла Ренкина (ОЦР) для утилизации тепла, до детального проектирования мобильной энергоустановки на этой основе. Результаты моделирования показывают, что такая установка может достигать электрического КПД около 30.5% при температуре -10°C, однако её эффективность значительно падает в тёплом климате, что требует адаптации режимов работы. Проектное решение характеризуется интегрированной системой подготовки топлива (сушка щепой уходящими газами) и оптимизированными параметрами, что делает его пригодным для энергоснабжения крупных перерабатывающих комплексов [13-15].

Для малых и удалённых терминалов с потребностями в сотни киловатт более перспективными могут быть менее сложные и капиталоемкие решения. В качестве таковых рассматриваются энергоустановки на основе паровых винтовых машин (ПВМ), таких как модель ПВМ-200, работающих в простом паровом цикле [14].

Современные исследования в области ПВМ развиваются в направлении создания цифровых двойников и уточнения физических моделей с учётом реальных процессов [15, 16]. Применение CFD-моделирования позволяет проводить трёхмерный анализ течения с учётом фазового перехода [17]. В России разработали методику расчёта характеристик ПВМ для лесопромышленного комплекса. Несмотря на обилие теоретических и лабораторных исследований, в литературе отмечен существенный пробел: отсутствуют комплексные работы по экспериментальной верификации моделей конкретных промышленных образцов (например, ПВМ-200) в составе реальных энергокомплексов лесных терминалов. Ценными предшественниками таких исследований являются работы по экспериментальной идентификации механизмов потерь [19], проверке цифровых двойников [20] и, в особенности, результаты опытно-промышленной эксплуатации энергокомплекса на базе ПВМ-150 на лесозаготовительном предприятии [21-22]. Восполнение данного пробела путём натурной верификации моделей является важной научно-практической задачей для надёжного внедрения подобных локальных энергоисточников.

Анализ литературы выявляет последовательную эволюцию исследований в области автономной биоэнергетики для лесного комплекса: от обоснования экономической и экологической целесообразности перехода на древесное топливо к глубокому технологическому анализу и сравнительной оценке различных методов преобразования энергии. Современный этап

характеризуется активным применением методов математического и имитационного моделирования для проектирования сложных гибридных систем (ГТУ+ОЦР) и совершенствования моделей более простых агрегатов, таких как паровые винтовые машины. Ключевой тенденцией является движение от теоретических расчётов и стендовых испытаний к созданию инженерных решений, адаптированных к суровым условиям эксплуатации и направленных на практическую реализацию.

Несмотря на значительный научный задел в области моделирования винтовых машин и наличие отдельных примеров их применения, выявлен чёткий пробел: отсутствие верифицированной на натурных данных теоретической модели промышленного образца ПВМ-200, работающего в реальных условиях лесозаготовительного комплекса.

Таким образом, целью настоящей работы является восполнение данного пробела путём проведения натурной экспериментальной верификации уточнённой теоретической модели ПВМ-200, интегрированной в реальный технологический процесс энергообеспечения лесозаготовительного терминала. Решение этой задачи позволит создать достоверный инструмент для проектирования, оптимизации и прогнозирования работы подобных локальных энергоисточников, снизив риски их внедрения.

Материалы и методы

Объектом исследования являлась паросиловая микротурбинная установка (ПВМ) ПВМ-200, рассматриваемая в качестве базового источника энергоснабжения автономных лесных терминалов. Целью экспериментальной работы была оценка энергетических характеристик установки, количественный анализ влияния параметров парового цикла на её мощность и верификация адекватности существующей теоретической модели на основе сравнения с массивом натурных данных.

Испытания проводились в условиях, приближенных к промышленной эксплуатации, на производственной площадке ООО «Промышленные компоненты КАМАЗ» (г. Набережные Челны). Температура окружающего воздуха составляла 20–25°C, атмосферное давление — нормальное. Программа испытаний включала три этапа: предварительную проверку оборудования, испытания без нагрузки (обкатка) и испытания под нагрузкой. Для построения нагрузочной характеристики были установлены пять фиксированных режимов, равномерно охватывающих рабочий диапазон входного давления пара. Продолжительность работы на каждом режиме составляла 5 часов для обеспечения выхода на

установившийся тепловой режим. Параметры режимов испытаний представлены в Таблице 1.

Таблица 1

Режимы испытаний ПВМ-200

Table 1

SSM-200 Test Modes

№ режима / Mode No.	Давление пара на входе, P _{вх} (МПа abs.) / Steam inlet pressure, P _{in} (MPa abs.)	Температура пара на входе, t _{вх} (°C) / Steam inlet temperature, t _{in} (°C)	Давление пара на выходе, P _{вых} (МПа abs.) / Steam outlet pressure, P _{out} (MPa abs.)	Частота вращения, n (об/мин) / Rotation speed, n (rpm)	Продолжительность, τ (ч) / Duration, τ (h)
1	0.216	121	0.15	3000	5
2	0.35	134	0.15	3000	5
3	0.43	125	0.15	3000	5
4	0.54	152	0.15	3000	5
5	0.60	158	0.15	3000	5
Итого / Total					25

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Для контроля и регистрации параметров использовался комплекс поверенных средств измерений. Измерение давления проводилось с помощью манометров класса точности 1.0, температуры — термопарами типа К (ТХА) с погрешностью ±1.5°C. Частота вращения вала контролировалась цифровым тахометром класса 0.5, а уровень вибрации и шума — шумомером-виброметром ШИ-01В класса 1. Синхронная запись значений с интервалом 5 секунд обеспечивалась автоматизированной системой сбора данных. В Таблице 2 представлены основные измеряемые параметры и средства контроля.

Таблица 2
Измеряемые параметры и средства контроля

Table 2
Measured Parameters and Control Means

Назначение параметра / Parameter Purpose	Средство измерений / Measuring Instrument	Класс точности / погрешность / Accuracy Class / Error
Давление пара / Steam pressure	Манометр / Pressure Gauge	1.0
Температура пара / Steam temperature	Термопара типа К (ТХА) / Type К Thermocouple (ТХА)	±1.5 °С
Частота вращения вала / Shaft rotation speed	Цифровой тахометр / Digital Tachometer	0.5
Уровень вибрации и шума / Vibration and noise level	Шумомер-виброметр ШИ-01В / Shi-01B Sound Level Meter and Vibrometer	1

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Обработка экспериментальных данных включала методы статистического анализа и регрессионного моделирования. Для каждого режима были усреднены результаты пяти независимых измерений выходной мощности. Зависимость мощности от входного давления получена методом наименьших квадратов путём аппроксимации степенной функцией. Качество аппроксимации оценивалось с помощью коэффициента детерминации (R^2). Верификация теоретической модели проводилась путём статистического сравнения экспериментальных данных с теоретическими предсказаниями. Для этого были рассчитаны стандартное отклонение, 95% доверительные интервалы и применён критерий согласия Пирсона (χ^2).

Результаты

В результате испытаний получены массивы данных для пяти режимов. Значения мощности для каждого режима получены в результате пяти

независимых измерений. На основе полученных данных были усреднены значения мощности для каждого из режимов, приведённые в таблице 3.

Методом наименьших квадратов получена степенная функция

$$N_{\text{эксн}} = 386 \cdot P_{\text{вх}}^{1,69}. \quad (1)$$

Коэффициент детерминации R^2 для данной зависимости составил 0,98, что свидетельствует о высоком качестве аппроксимации. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных точек от аппроксимирующей кривой в диапазоне мощностей от 10 до 200 кВт составило $\sigma=3.98$ кВт с относительной погрешностью 2%.

Теоретическая линейная зависимость расхода пара от мощности $G = f(N_{\text{теор}})$ (см. рисунок 2), выглядит как:

$$G = 0,0167 \cdot N_{\text{теор}} - 0,667. \quad (2)$$

Преобразуем десятичные дроби в обыкновенные и выразим значение $N_{\text{теор}}$:

$$N_{\text{теор}} = 60 \cdot G - 40. \quad (3)$$

Если принять, что расход пара G изменяется в зависимости от давления на входе $P_{\text{вх}}$, теоретическую зависимость $N_{\text{теор}}(G)$ можно привести к виду $N_{\text{эксн}}(G)$. Для сравнения теоретических и экспериментальных данных необходимо выразить расход пара G через давление на входе $P_{\text{вх}}$.

При условии пропорциональной связи расход пара можно представить выражением:

$$G = \left(\frac{N_{\text{эксн}}}{386 \cdot k^{1,69}} \right)^{0,59}, \quad (4)$$

где коэффициент k подбирается из условия соответствия расхода $G=4$ т/ч мощности $N = 200$ кВт, что даёт $k=0,049$.

Следовательно, аппроксимированное значение мощности $N_{\text{аппр}}$ описывается зависимостью:

$$N_{\text{аппр}} = 18,91 \cdot G^{1,69}. \quad (5)$$

Для оценки точности и адекватности полученной зависимости рассчитаем аппроксимированные значения мощности $N_{\text{аппр}}$ и сравним их со средними экспериментальными значениями $N_{\text{эксн}}$, чтобы определить среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (N_{\text{эксн},i} - N_{\text{аппр},i})^2}{n-1}}. \quad (6)$$

В диапазоне мощностей от 10 до 200 кВт $\sigma=0,014$, что указывает на пренебрежимо малую относительную погрешность.

На основании полученных результатов построен график, представленный на рисунке 3, сопоставляющий теоретическую формула (3) и аппроксимированную формула (5) зависимости

мощности ПВМ-200 от расхода пара, определяемого по формуле 4.

Сравнение экспериментальных и теоретических кривых выявило схожую тенденцию роста, однако количественные значения различаются. Полученная в ходе испытаний аппроксимационная зависимость проходит ниже теоретической кривой. Это расхождение обусловлено факторами, не учтенными в теоретической модели: механическими потерями, неравномерностью подачи пара и тепловыми потерями.

Для количественной проверки согласия теоретической модели с новой зависимостью использован критерий Пирсона. Результаты расчетов, включая аппроксимационные и теоретические значения мощности, границы доверительных интервалов и вклад каждого режима в критерий χ^2 сведены в таблицу 5.

Расчитанное значение критерия $\chi^2_{\text{расч}}=24,73$. При уровне значимости 0,95 и числе степеней свободы 5 табличное значение $\chi^2_{\text{табл}}=9,49$. Поскольку $\chi^2_{\text{расч}} > \chi^2_{\text{табл}}$, гипотеза о согласии теоретических и полученных в ходе опыта результатов признана несостоятельной, так как расхождения статистически значимы.

Исходя из полученных значений, построен график с доверительными интервалами, представленный на рисунке 1.

Ключевым выводом является статистически значимое расхождение теоретических и экспериментальных данных: значения, предсказанные моделью, выходят за пределы доверительных интервалов измерений. Это служит прямым статистическим доказательством недостаточной адекватности теоретической модели.

Обсуждение

Проведённые натурные испытания паросиловой микротурбинной установки ПВМ-200 позволили получить экспериментальные данные, анализ которых даёт основание для оценки адекватности существующей теоретической модели и уточнения её параметров.

Ключевым результатом работы является установление эмпирической зависимости выходной мощности от давления пара на входе в виде степенной функции с высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0.98$). Данный факт свидетельствует о сильной нелинейной связи между этими параметрами в исследованном диапазоне.

Полученная зависимость принципиально отличается от линейной теоретической модели, связывающей мощность с расходом пара. Это расхождение является статистически значимым, что подтверждается результатами проверки по критерию Пирсона ($\chi^2_{\text{расч}} > \chi^2_{\text{табл}}$).

Основными факторами, обуславливающими выявленное расхождение между теоретической и экспериментальной кривыми, могут являться:

1. Механические потери, не учтённые в идеализированной модели. К ним относятся потери на трение в подшипниках, зубчатых зацеплениях редуктора и на уплотнениях, которые возрастают с увеличением частоты вращения и нагрузки, потребляя часть индикаторной мощности.
2. Тепловые потери в окружающую среду. Теоретическая модель предполагает адиабатическое расширение, в то время как реальный процесс сопровождается теплообменом с элементами конструкции и окружающим воздухом, что снижает доступную для преобразования энергию пара.
3. Гидравлические потери и неидеальность потока. В реальной установке имеют место потери давления в трактах, парораспределительном устройстве и проточной части турбины, а также отклонения реального процесса расширения от изоэнтропного, что снижает эффективный перепад энтальпий.
4. Погрешность косвенного определения расхода пара через давление на входе. Принятая в теоретическом сопоставлении пропорциональная связь $G = f(P_{\text{вх}})$ может не полностью отражать реальные характеристики регулирующей арматуры и изменение параметров пара на входе.

Обнаруженное систематическое занижение экспериментальных значений мощности относительно теоретических предсказаний (экспериментальная кривая на рисунке 3 проходит ниже теоретической) указывает на то, что теоретическая модель, основанная на термодинамическом расчёте идеального цикла, требует корректировки с введением интегрального коэффициента потерь, зависящего от режима работы.

Параметры ПВМ-200 при испытаниях под нагрузкой

Table 3

SSM-200 parameters during load testing

Назначение измеряемых параметров Purpose of the measured parameters	Ед. изм. Units of measurement	Режимы испытаний Test modes				
		1	2	3	4	5
Давление пара в коллекторе пара Steam pressure in the steam manifold	МПа MPa	0,9	0,9	0,9	0,89	0,87
Давление пара на входе в расширитель Steam pressure at the expander inlet	МПа MPa	0,125	0,321	0,461	0,571	0,706
Температура пара на входе в расширитель Steam temperature at the expander inlet	°C	122,8	139,6	151,6	161,6	167,7
Давление пара на выходе из расширителя Steam pressure at the expander outlet	МПа MPa	0,046	0,047	0,048	0,051	0,050
Температура пара на выходе из расширителя Steam temperature at the expander outlet	°C	110,9	112,5	112,9	111,5	111,3
Давление масла в коллекторе Oil pressure in the manifold	кг/см ² kg/sm ²	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Температура масла в коллекторе Oil temperature in the manifold	°C	17,1	17,1	17,1	24,5	24,6
Температура масла на сливе шестерни связи Oil temperature at the coupling gear drain	°C	32,3	34,3	35,4	36,6	35,4
Температура масла на сливе подшипников Oil temperature at the bearing drain	°C	33,6	35,6	36,3	37,7	41,6
Температура масла на сливе шестерни редуктора Oil temperature at the gearbox drain	°C	25,7	26,5	32,5	36,2	36,6
Температура воды на входе в теплообменник Water temperature at the heat exchanger inlet	°C	18,0	12,0	12,0	12,0	12,9
Температура воды на выходе из теплообменника Water temperature at the heat exchanger outlet	°C	18,7	18,7	18,7	21,7	20,5
Расход охлаждающей воды Cooling water flow rate	т/ч ton/h	0	4,1	16,1	18,0	16,4
Уровень вибрации на шестернях связи Vibration level at the coupling gear	мм/с mm/c	1,7	2,5	3,2	5,3	6,0
Уровень вибрации на шестернях редуктора Vibration level at the gearbox gear	мм/с mm/c	1,1	1,3	1,7	2,2	2,3
Уровень шума Noise level	дБ dB	73,7	74,8	74,8	74,9	75,2
Частота вращения выходного вала расширителя Expander output shaft speed	об/мин rpm	3003	3005	3009	3012	3015
Мощность генератора Generator power	кВт kW	11,2	60,3	105,7	156,7	210,8
		10,9	65,4	107,8	149,3	198,7

Технологии. Машины и оборудование

		11,0	63,3	106,3	155,5	201,7
		10,7	60,7	100,9	147,1	196,6
		10,9	62,7	104,5	148,9	194,8

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Таблица 4

Эмпирическая зависимость $N_{\text{эксп}} = f(P_{\text{вх}})$

Table 4

Empirical dependence $N_{\text{эксп}} = f(P_{\text{вх}})$

Давление пара на входе $P_{\text{вх}}$, МПа abs Steam inlet pressure $P_{\text{вх}}$, МПа abs	0,125	0,321	0,461	0,571	0,706
Средняя мощность $N_{\text{эксп}}$, кВт Average power N_{exp} , kW	11	62	105	152	201

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

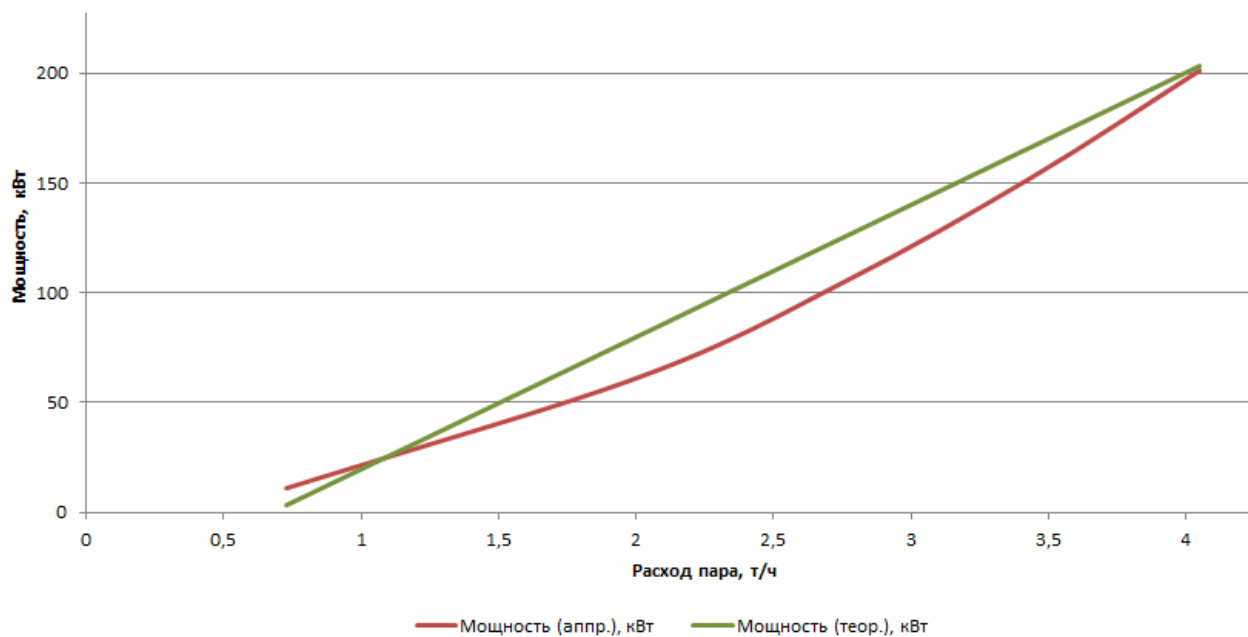


Рисунок 2. Зависимости мощности ПВМ-200

Figure 2. SSM-200 power dependence schedule

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Проверка по критерию Пирсона

Table 5

Pearson's test

Давление пара на входе $P_{вх}$, МПа абс Steam inlet pressure $R_{вх}$, MPa abs	Мощность $N_{эксп}$, кВт Power N_{exp} , kW	Мощность $N_{теор}$, кВт Power N_e , kW	DI_{min} CI_{min}	DI_{max} CI_{max}	Стандартное отклонение s_i Standard deviation s_i	Значение критерия χ^2 The value of the χ^2 criterion
0,125	11	3,54	10,77	11,23	0,18	15,69
0,321	62	81,14	59,43	64,57	2,07	4,52
0,461	105	125,45	101,77	108,23	2,60	3,33
0,571	152	165,93	146,66	157,34	4,30	1,17
0,706	201	202,96	192,19	208,81	6,29	0,02
Итого:						24,73

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

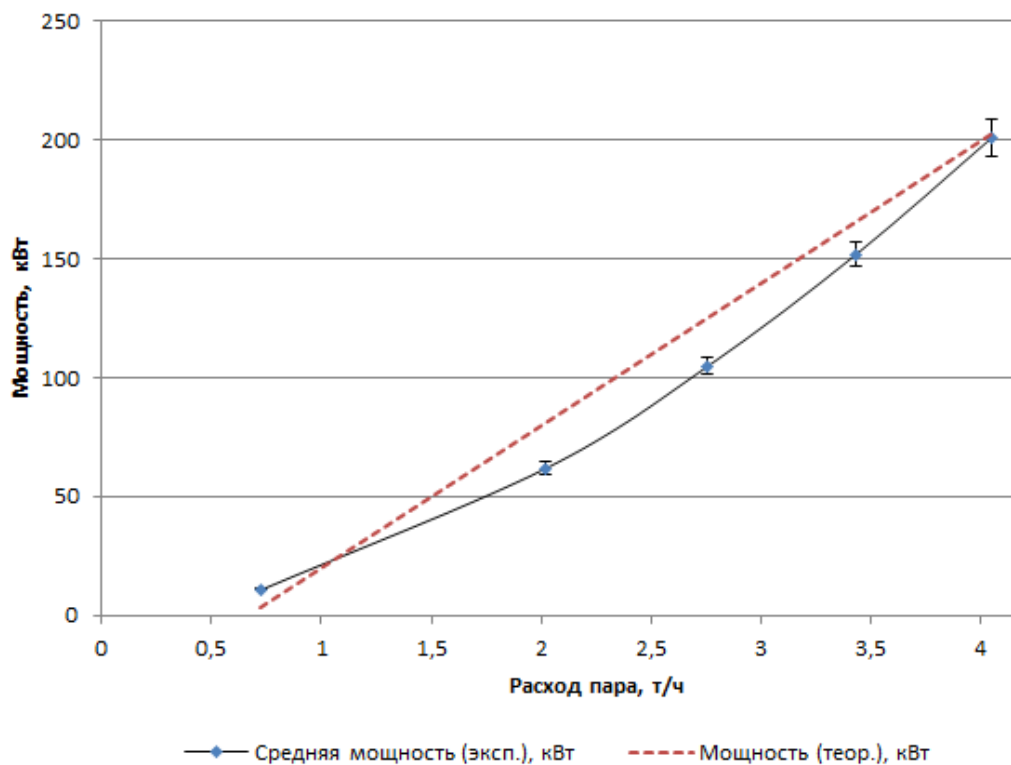


Рисунок 3. График проверки по критерию Пирсона

Figure 3. Pearson's test schedule

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

С практической точки зрения, полученная степенная эмпирическая зависимость $N = 386 \cdot P_{вх}^{1,69}$ представляет большую ценность для инженерных расчётов при проектировании энергокомплексов на базе ПВМ-200, так как позволяет с высокой точностью прогнозировать её выходную мощность по легко измеряемому параметру — давлению в паровой магистрали. Низкое среднеквадратичное отклонение ($\sigma = 3.98$ кВт) подтверждает пригодность данной модели для практического применения.

Таким образом, результаты исследования подтверждают необходимость использования для целей проектирования и оптимизации режимов работы уточнённых моделей, основанных на экспериментальных данных или включающих в теоретические расчёты поправочные коэффициенты, учитывающие механические, гидравлические и тепловые потери. Дальнейшие исследования могут быть направлены на декомпозицию общих потерь и построение более детальной физически обоснованной модели, параметры которой идентифицируются по результатам испытаний.

Заключение

На основании данных стендовых испытаний, выполненных на базе ООО «Промышленные компоненты КАМАЗ», была установлена экспериментальная зависимость мощности паровой винтовой машины ПВМ-200 от расхода поступающего пара. Аппроксимация данных испытаний позволила получить степенную функцию $N_{\text{аппр}} = 18,91 \cdot G^{1,69}$.

Данная зависимость была сопоставлена с теоретической моделью, представленной в виде $N_{\text{теор}} = 60 \cdot G - 40$. Статистический анализ сравнения выявил существенное расхождение между кривыми; теоретические значения не попадают в доверительные интервалы экспериментальных данных, что указывает на недостаточную точность исходной модели.

Установленная эмпирическая зависимость мощности от расхода пара будет использована для разработки усовершенствованной математической модели функционирования лесного терминала, что позволит повысить точность расчётов за счёт учёта реальных эксплуатационных параметров. Проведённое исследование, основанное на методологии натуральных испытаний и статистического анализа, позволило осуществить верификацию теоретической модели работы паросиловой микротурбинной установки ПВМ-200 и получить количественную оценку её энергетических характеристик.

Установлено, что зависимость выходной мощности от давления пара на входе адекватно описывается нелинейной степенной функцией с высоким коэффициентом детерминации, что свидетельствует о её надёжности для прогнозных инженерных расчётов.

Сравнительный анализ выявил статистически значимое систематическое расхождение между экспериментальными данными и предсказаниями линейной теоретической модели, базирующейся на термодинамике идеального цикла. Это расхождение обусловлено комплексом неучтённых эксплуатационных потерь — механических, гидравлических и тепловых, — что указывает на ограниченную применимость исходной модели для задач точного проектирования.

Таким образом, работа подтверждает необходимость использования для проектирования и оптимизации интегрированных энергосистем уточнённых моделей, параметризованных по данным натуральных испытаний или дополненных корректирующими коэффициентами, учитывающими реальные потери. Полученные результаты и применённая методика формируют основу для дальнейших исследований, направленных на декомпозицию потерь и разработку детализированных физико-математических моделей распределённых энергоустановок.

Список литературы

1. Maganov I., Tihonov E., Petrusha S., Trushevskiy P., Morkovin V., Kunitskaya O. Study of the energy balance of forest terminals operating on biofuel energy sources. *Forestry Engineering Journal*, 2024; 14: 5-22. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/1>.
2. Vasković S., Tanić Lj., Gvero P., Husika A. Operational Analysis and Optimization of a District Heating Plant Using Wood Chips. *Power Engineering and Engineering Thermophysics*, 2025; 3: 254-265. – DOI: <https://doi.org/10.56578/peet030403>.
3. Derezińska A., Redosz K. A Model-Driven Engineering Approach to the Evaluation of a Remote Controller of a Movement Assistant System. In: Gruca A., Brachman A., Kozielski S., Czachórski T. (eds.). *Man–Machine Interactions 4*. Cham: Springer, 2016: 69-78. – (Advances in Intelligent Systems and Computing; 391). – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-23437-3_7.

4. Мехренцев А.В., Корж М.А. Теплогенерация на основе древесного топлива как база для повышения энергоэффективности в лесопромышленном производстве. Леса России и хозяйство в них. – 2019. – № 3 (70). – С. 78–86.
5. Марченко О.В., Соломин С.В. Сравнительная стоимостная оценка энергетического использования древесных отходов и традиционных топлив для производства электроэнергии и тепла. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 7. – С. 34–42.
6. Марченко О., Соломин С., Козлов А. Возможности использования древесных отходов в энергетике России. Экология и промышленность России, 2019; 23 (6): 17-21. – DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-6-17-21>.
7. Козырь Д.А., Губин В.Е., Янковский С.А. Оценка экологической эффективности ресурсосберегающих проектов топливно-энергетического комплекса. Энергетические установки и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 3. – С. 86-93.
8. Водождокова З.А., Курмалиева З.Х., Гишева С.Ш. Развитие биоэкономики в рамках реализации стратегических кластерных инициатив в лесопромышленном комплексе региона. Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 5: Экономика. – 2020. – № 3(265). – С. 15–22.
9. Guzović Z., Duic N., Piacentino A., Markovska N., Mathiesen B.V., Lund H. Recent advances in methods, policies and technologies at sustainable energy systems development. Energy, 2022; 245: 123276. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123276>.
10. Ali Omidkar, Raziq Es'haghian, Hua Song. Predicting biomass transportation costs: A machine learning approach for enhanced biofuel competitiveness. Cleaner Logistics and Supply Chain, 2025; 16: 100252. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2025.100252>.
11. Cheng W., Zhang Y., Wang P. Effect of spatial distribution and number of raw material collection locations on the transportation costs of biomass thermal power plants. Sustainable Cities and Society, 2020; 55: 102040. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102040>.
12. Куницкая О.А., Помогуев А.В., Калита Е.Г., Швецова В.В., Тихонов Е.А. Анализ газогенерирующих систем для автономного энергоснабжения лесных терминалов. Resources and Technology. – 2021. – Т. 18. – № 3. – С. 53–76.
13. Анисимов П.Н., Медяков А.А. Разработка и численное моделирование энергоустановки с газовой турбиной открытого цикла и паровой турбиной с органическим рабочим телом. Научный журнал. – 2022. – С. 3–6.
14. Анисимов П.Н., Ширнин Ю.А., Петухов И.В., и др. Разработка мобильной энергоустановки на древесном топливе для автономного энергообеспечения объектов лесного комплекса. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2024. – № 248. – С. 206-219. – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.248.206-219>.
15. Галашов Н.Н., Цибульский С.А. Параметрический анализ схемы парогазовой установки с комбинацией трех циклов для повышения КПД при работе в северных газодобывающих районах. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 44–55. – DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/5/274>.
16. Сукманова Т.В., Белов Н.С. Цифровой двойник как инструмент моделирования и оптимизации сложных природных и технических систем. Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. – 2025. – № 1. – С. 40–57. – DOI: <https://doi.org/10.5922/vestniknat-2025-1-3>.
17. El Azzaoui A., Kim T.W., Loia V., Park J.H. Blockchain-based secure digital twin framework for smart healthy city. In: Park J., Loia V., Yi G., Sung Y. (eds.). Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2021: 107-113. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-9309-3_15.
18. Giuffrida N., Fajardo-Calderin J., Masegosa A.D., Werner F., Steudter M., Pilla F. Optimization and Machine Learning Applied to Last-Mile Logistics: A Review. Sustainability, 2022; 14 (9): 1-16.

19. Dzuban A.V., Galstyan A.A., Kovalenko N.A., Uspenskaya I.A. Thermodynamic Modeling of Multicomponent Rare Earth Nitrates Aqueous Systems. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2021; 95 (12): 2394-2404. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036024421120074>.
20. Schweizer F., Fürst M., Wachtmeister G. Modeling and Validation of a Two-Phase Flow Valve for Expanders in Waste Heat Recovery. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2021; 13 (3): 031022. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4048675>.
21. Zhao Z., Zhang J., Wang G., Yuan H., Tian Y. Research and clearance analysis on of steam twin-screw expander employed in industrial waste heat recovery. *Energy*, 2024; 312: 133439. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133439>.
22. Lee S., Kim D., Ha H., Kim M.S. Pressure energy recovery of LNG integrated with multi-stage feedwater fuel preheaters in a combined cycle power plant. *Energy*, 2023; 285: 128694. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128694>.

References

1. Maganov I., Tihonov E., Petrusha S., Trushevskiy P., Morkovin V., Kunitskaya O. Study of the energy balance of forest terminals operating on biofuel energy sources. *Forestry Engineering Journal*, 2024; 14: 5-22. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/1>.
2. Vasković S., Tanić Lj., Gvero P., Husika A. Operational Analysis and Optimization of a District Heating Plant Using Wood Chips. *Power Engineering and Engineering Thermophysics*, 2025; 3: 254-265. – DOI: <https://doi.org/10.56578/peet030403>.
3. Derezińska A., Redosz K. A Model-Driven Engineering Approach to the Evaluation of a Remote Controller of a Movement Assistant System. In: Gruca A., Brachman A., Kozielski S., Czachórski T. (eds.). *Man–Machine Interactions 4*. Cham: Springer, 2016: 69-78. – (Advances in Intelligent Systems and Computing; 391). – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-23437-3_7.
4. Mekhrentsev A.V., Korzh M.A. Teplogeneratsiya na osnove drevesnogo topliva kak baza dlya povysheniya energoeffektivnosti v lesopromyshlennom proizvodstve. [Heat generation based on wood fuel as a basis for improving energy efficiency in timber industry]. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh* = [Forests of Russia and their Management], 2019; 3(70): 78-86.
5. Marchenko O.V., Solomin S.V. Sravnitel'naya stoimostnaya otsenka energeticheskogo ispol'zovaniya drevesnykh otkhodov i traditsionnykh topliv dlya proizvodstva elektroenergii i tepla. [Comparative cost assessment of energy use of wood waste and traditional fuels for electricity and heat generation]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* = [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2021; 332(7): 34-42.
6. Marchenko O., Solomin S., Kozlov A. Vozmozhnosti ispol'zovaniya drevesnykh otkhodov v energetike Rossii. [Potential for using wood waste in the Russian energy sector]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* = [Ecology and Industry of Russia], 2019; 23(6): 7-21. – DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-6-17-21>.
7. Kozyr' D.A., Gubin V.E., Yankovskiy S.A. Otsenka ekologicheskoy effektivnosti resursosberegayushchikh proektov toplivno-energeticheskogo kompleksa. [Assessment of environmental efficiency of resource-saving projects in the fuel and energy sector]. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii* = [Power Plants and Technologies], 2023; 9(3): 86-93.
8. Vodozhdokova Z.A., Kurmalieva Z.Kh., Gisheva S.Sh. Razvitie bioekonomiki v ramkakh realizatsii strategicheskikh klasternykh initsiativ v lesopromyshlennom komplekse regiona. [Development of bioeconomy within the framework of implementing strategic cluster initiatives in the regional forestry sector]. *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 5: Ekonomika* = [Bulletin of the Adyghe State University. Series 5: Economics], 2020; 3(265): 15-22.
9. Guzović Z., Duic N., Piacentino A., Markovska N., Mathiesen B.V., Lund H. Recent advances in methods, policies and technologies at sustainable energy systems development. *Energy*, 2022; 245: 123276. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123276>.

10. Omidkar A., Es'haghian R., Song H. Predicting biomass transportation costs: A machine learning approach for enhanced biofuel competitiveness. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 2025; 16: 100252. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2025.100252>.
11. Cheng W., Zhang Y., Wang P. Effect of spatial distribution and number of raw material collection locations on the transportation costs of biomass thermal power plants. *Sustainable Cities and Society*, 2020; 55: 102040. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102040>.
12. Kunitskaya O.A., Pomiguyev A.V., Kalita E.G., Shvetsova V.V., Tikhonov E.A. Analiz gazogeneriruyushchikh sistem dlya avtonomnogo energosnabzheniya lesnykh terminalov. [Analysis of gas generating systems for autonomous power supply of forest terminals]. *Resources and Technology*, 2021; 18(3): 53-76.
13. Anisimov P.N., Medyakov A.A. Razrabotka i chislennoe modelirovanie energoustanovki s gazovoy turbinoi otkrytogo tsikla i parovoy turbinoi s organicheskim rabochim telom. [Development and numerical modeling of a power plant with an open-cycle gas turbine and an organic Rankine cycle steam turbine]. *Energoberezhnie i vodopodgotovka = [Energy Saving and Water Treatment]*, 2022; 6(140): 42-46.
14. Anisimov P.N., Shirnin Yu.A., Petukhov I.V. [i dr.]. Razrabotka mobil'noy energoustanovki na drevesnom toplive dlya avtonomnogo energoobespecheniya ob'yektov lesnogo kompleksa. [Development of a mobile wood-fueled power plant for autonomous energy supply of forestry complex facilities]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii = [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy]*, 2024; 248: 206-219. – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.248.206-219>.
15. Galashov N.N., Tsibul'skiy S.A. Parametricheskii analiz skhemy parogazovoy ustanovki s kombinatsiyey trekh tsiklov dlya povysheniya KPD pri rabote v severnykh gazodobyvayushchikh rayonakh. [Parametric analysis of a combined-cycle power plant scheme with a combination of three cycles to improve efficiency in northern gas production regions]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]*, 2019; 330(5): 44-55. – DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/5/274>.
16. Sukmanova T.V., Belov N.S. Tsifrovoy dvoynik kak instrument modelirovaniya i optimizatsii slozhnykh prirodnykh i tekhnicheskikh sistem. [Digital twin as a tool for modeling and optimizing complex natural and technical systems]. *Vestnik Baltiyskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Ser.: Estestvennyye i meditsinskie nauki = [Bulletin of the Baltic Federal University named after I. Kant. Ser.: Natural and Medical Sciences]*, 2025; 1: 40-57. – DOI: <https://doi.org/10.5922/vestniknat-2025-1-3>.
17. El Azzaoui A., Kim T.W., Loia V., Park J.H. Blockchain-based secure digital twin framework for smart healthy city. In: Park J., Loia V., Yi G., Sung Y. (eds.). *Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering*. Singapore: Springer Singapore, 2021: 107-113. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-9309-3_15.
18. Giuffrida N., Fajardo-Calderin J., Masegosa A.D., Werner F., Steudter M., Pilla F. Optimization and Machine Learning Applied to Last-Mile Logistics: A Review. *Sustainability*, 2022; 14 (9): 1-16.
19. Dzuban A.V., Galstyan A.A., Kovalenko N.A., Uspenskaya I.A. Thermodynamic Modeling of Multicomponent Rare Earth Nitrates Aqueous Systems. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2021; 95 (12): 2394-2404. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036024421120074>.
20. Schweizer F., Fürst M., Wachtmeister G. Modeling and Validation of a Two-Phase Flow Valve for Expanders in Waste Heat Recovery. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2021; 13 (3): 031022. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4048675>.
21. Zhao Z., Zhang J., Wang G., Yuan H., Tian Y. Research and clearance analysis on of steam twin-screw expander employed in industrial waste heat recovery. *Energy*, 2024; 312: 133439. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133439>.
22. Lee S., Kim D., Ha H., Kim M.S. Pressure energy recovery of LNG integrated with multi-stage feedwater fuel preheaters in a combined cycle power plant. *Energy*, 2023; 285: 128694. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128694>.

Сведения об авторах

Петруша Сергей Витальевич – аспирант кафедры транспортных и технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0879-6499>, e-mail: ros-nano@yandex.ru.

Тихонов Евгений Андреевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры транспортных и технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: tihonov@petsu.ru.

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

Перфильев Павел Николаевич – кандидат технических наук, зав. кафедрой лесопромышленных производств и обработки материалов ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>, e-mail: p.perfilev@narfu.ru.

Ревяко Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины природообустройства» Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К.Кортунова - филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», г. Новочеркасск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>, e-mail: revyako77@mail.ru.

Information about the authors

Sergey V. Petrusha – Postgraduate Student of the Department of Transport and Technological Machinery and Equipment, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0879-6499>, e-mail: ros-nano@yandex.ru.

Evgeny A. Tikhonov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Transport and Technological Machinery and Equipment, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: tihonov@petsu.ru.

✉ *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 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>, e-mail: 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.

Pavel N. Perfilev – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Timber Industry and Materials Processing of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>, e-mail: p.perfilev@narfu.ru.

Sergey I. Revyako – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Environmental Management Machines" Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov - branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>, e-mail: revyako77@mail.ru.

✉ Для контактов / Corresponding author