

Министерство науки и высшего образования РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
имени С.М. Кирова»

Институт технологических машин и транспорта леса

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО ИТОГАМ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ
2025 ГОДА**

9 – 20 февраля 2026 г.



Санкт-Петербург
2025

Рекомендовано к изданию
Научно-техническим советом Санкт-Петербургского государственного
лесотехнического университета

Ответственный редактор:

С. А. Угрюмов, доктор технических наук, профессор.

Члены редколлегии:

С. В. Спиридонов, кандидат технических наук, доцент.

А. А. Куликов, кандидат технических наук, доцент.

Л. Я. Громская, кандидат технических наук, доцент.

А. С. Кривоногова, кандидат технических наук, доцент.

А. В. Теппоев, кандидат технических наук, доцент.

УДК 630*3
OECD 04.01. RF FORESTRY

ГРНТИ 66.01.00, 66.17.00, 66.19.00
ББК 43.90

Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2025 года [Электронный ресурс] / отв. редактор С.А. Угрюмов. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2026. – 411 с. Режим доступа: свободный. URL: <http://spbftu.ru>.

Collection of articles based on the materials of the scientific and technical conference of the Institute of Technological Machines and Forest Transportation based on the results of research work in 2025 [Electronic resource] / ed. editor S.A. Ugryumov. – St. Petersburg: SPbSFTU, 2026. – 411 p. Access mode: free. URL: <http://spbftu.ru>.

В сборнике представлены материалы докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ 2025 года института технологических машин и транспорта леса Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета. Тематика конференции охватывает широкий круг вопросов лесопромышленного комплекса. Сборник предназначен для работников лесной и деревоперерабатывающей промышленности, студентов, аспирантов и преподавателей вузов.

Сборник рецензируемый.

The collection presents materials from the reports of a scientific and technical conference on the results of research work in 2025 of the Institute of Technological Machines and Forest Transport of St. Petersburg State Forestry University. The subject of the conference covers a wide range of issues of the timber industry. The collection is intended for workers in the forestry and woodworking industry, students, graduate students and university professors.

The collection is peer-reviewed.

© СПбГЛТУ, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА...	8
<i>Антонова Т.С., Зинченко В.С.</i> Прогнозирование спроса на продукцию в лесопромышленном комплексе.....	8
<i>Городецкий Ю.А., Ларкин Р.В., Кацадзе В.А.</i> Сравнительный анализ технологий и эффективности применения пеллет и брикетов в качестве альтернативного топлива для бытового потребления в Краснодарском и Ставропольском краях.....	13
<i>Добрынин Ю.А., Михитаров А.Р.</i> К вопросу изменения параметров технологического процесса при вибрационном корчевании пней.....	19
<i>Ларкин Р.В., Городецкий Ю.А., Кацадзе В.А.</i> Перспективы и возможности развития плантационных насаждений в РФ с целью получения биомассы с заданными свойствами.....	26
<i>Мотовилов Г.К., Тюрин Н.А.</i> Территориальное размещение пеллетных производств эволюционным методом математической оптимизации.....	32
<i>Науман А.И., Романов С.В.</i> Анализ современного состояния и перспектив развития малого лесного бизнеса в Республике Карелия...	38
<i>Потапов Ю.А., Угрюмов С.А.</i> Повышение надежности работы технологического оборудования предприятий лесопромышленного комплекса путем использования источников бесперебойного питания в системах электроснабжения.....	46
2. ЛЕСОЗАГОТОВКА И ТРАНСПОРТ ЛЕСА.....	51
<i>Абрамов Н.А., Угрюмов С.А.</i> Конструктивные особенности подборщика-пакетировщика лесосечных отходов John Deere 1490D...	51
<i>Белов С.В., Силецкий В.В.</i> Теоретические основы системы ИИ-управления БПЛА для высокоточной топографической съемки автомобильных дорог.....	57
<i>Бодров А.В., Силецкий В.В.</i> Анализ возможности применение цементогрунтов укрепленных полимерными волокнами при реконструкции лесных дорог.....	62
<i>Василюк К.Д., Бодров А.В.</i> Влияние нанодиоксида кремния на морозное пучение грунтов в основаниях лесных дорог.....	68
<i>Галактионов О.Н., Шадрин Р.А.</i> Очистка лесосек в системе технологий лесозаготовительного производства.....	73

<i>Зубова О.В., Куделевич К.В.</i> Перспективы развития мультимодальных перевозок в лесной отрасли.....	82
<i>Козлова И.К., Орлов В.В., Локиштанов Б.М.</i> Расчет объема работ на лесных терминалах.....	88
<i>Круль Т.А., Силецкий В.В.</i> Анализ эффективности лигнина для укрепления грунтов в дорожном строительстве.....	97
<i>Мионов А.А., Василюк К.Д.</i> Анализ применения композиционных добавок на основе органических отходов для стабилизации грунтов при строительстве лесных дорог.....	102
<i>Науман А.И., Кокорева С.В.</i> Трансформация харвестерных технологий: от моторной пилы к интеллектуальному лесозаготовительному комплексу.....	107
 3. ТЕПЛОТЕХНИКА, ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА.....	115
<i>Иванова И.В.</i> Инновационный теплоизоляционный материал для повышения энергосбережения при теплоснабжении.....	115
<i>Иванова И.В.</i> Солнечная энергия в системах теплоснабжения потребителей.....	122
<i>Иванова И.В.</i> Сохранение мощности дизельной электростанции при переводе на генераторный газ из древесных отходов.....	130
<i>Науман А.И., Кокорева С.В.</i> Оценка энергетической эффективности применения теплового насоса для утилизации тепла вытяжного воздуха лесосушильной камеры.....	135
 4. МАШИНОСТРОЕНИЕ.....	143
<i>Байлов К.А., Садыков Р.Ф., Кривоногова А.С., Пушков Ю.Л.</i> Особенности эксплуатации и определение технического состояния гидрораспределителя золотникового типа.....	143
<i>Величко Т.Р., Лукин Е.А., Кривоногова А.С., Пушков Ю.Л.</i> Методика проверки технического состояния рабочей тормозной системы с пневматическим приводом лесовозного тягача.....	150
<i>Дурманов М.Я., Спиридонов С.В.</i> Анализ компонент технико-экономических критериев функционирования лесохозяйственного машинно-тракторного агрегата на базе трактора «Кировец».....	156
<i>Дурманов М.Я., Спиридонов С.В.</i> Техничко-экономические критерии функционирования лесохозяйственного машинно-тракторного агрегата на установившихся режимах.....	166

<i>Дурманов М.Я., Спиридонов С.В.</i> Техничко-экономические критерии функционирования лесохозяйственного машинно-тракторного агрегата на неустановившихся режимах.....	174
<i>Куттеева М.А., Чураков А.В.</i> Применение аддитивных технологий для создания высокоточных компонентов турбин и двигателей.....	182
<i>Михайлов О.А.</i> Аналитические зависимости взаимодействия колесного движителя лесных машин в зимних условиях.....	188
<i>Михайлов О.А.</i> Особенности учета сил сопротивления движению трелевочных тракторов на лесосеке.....	193
<i>Михайлов О.А.</i> Особенности эксплуатации трелевочных тракторов на лесосеках с резко пересеченным рельефом.....	199
<i>Стрельцов С.В., Охапкин Т.А., Власов Е.Н.</i> Пример выбора каната, блоков и крюка типового механизма подъема.....	204
<i>Стрельцов С.В., Охапкин Т.А., Власов Е.Н.</i> Пример выбора редуктора и тормоза типового механизма подъема.....	210
<i>Стрельцов С.В., Охапкин Т.А., Власов Е.Н.</i> Пример расчета грузового барабана, крепления каната к нему и выбор необходимого электродвигателя механизма подъема.....	217
<i>Тарадин Г.С.</i> Математическая модель эксплуатации колесного форвардера 8х8 с различными вариантами ходовой системы в зимних условиях.....	224
<i>Тарадин Г.С.</i> Процесс сжатия снега колесным движителем на лесосеке	231
<i>Тарадин Г.С.</i> Расчет давления колесного движителя на снег с учетом цикличности приложения нагрузки.....	238
<i>Трофимов А.В., Зверев И.А., Просвирина Д.А., Трифонов Н.И.</i> Возможности цифровых технологий в проектировании технологических процессов лесного машиностроения.....	243
<i>Трофимов А.В., Зверев И.А., Просвирина Д.А., Трифонов Н.И.</i> Перспективы внедрения технологии «цифровой двойник» в лесном машиностроении.....	250
<i>Трубников В.В., Марков В.А., Зверев И.А., Трофимов А.В., Просвирина Д.А.</i> К оценке направлений повышения коррозионной стойкости элементов конструкции лесных машин.....	256
<i>Садыков Р.Ф., Байлов К.А., Кривоногова А.С., Пушков Ю.Л.</i> Оценка эксплуатационной нагруженности колесного лесопромышленного трактора.....	264

5. ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ.....	273
<i>Бирман А.Р., Козловская К.А., Угрюмов С.С.</i> Сборка слоистых пакетов из древесных материалов.....	273
<i>Бирман А.Р., Угрюмов С.С., Орлов В.В.</i> Производство погонажных изделий из древесно-клеевых масс.....	282
<i>Болдырев И.В., Елисеев И.В.</i> Разработка системы мониторинга и диспетчеризации сушильной камеры древесины на базе оборудования ОВЕН и SCADA-системы.....	287
<i>Грязнов Н.А.</i> Повышение эффективности переработки низколиквидной древесины на предприятиях лесопромышленного комплекса.....	294
<i>Коченгина О.Е., Куттуева М.А., Парфенопуло Г.К.</i> Разработка композиционных материалов на основе древесных волокон и полимерных связующих для производства строительных и отделочных материалов.....	299
<i>Угрюмов С.А., Макаров И.В.</i> Организация выпуска брикетов из коры в условиях целлюлозно-бумажного производства.....	305
<i>Федяев Ал.А., Гончарова Н.А., Федяев П.А., Григорьева Т.А., Трифонов Н.И.</i> Исследования рабочих характеристик рабочей камеры для сушки пиломатериалов.....	312
<i>Федяев Ал.А., Гончарова Н.А., Федяев П.А., Игнатьева С.М., Трифонов Н.И.</i> Моделирование неравномерного теплообмена при термовлажностной обработке древесины.....	318
<i>Федяев Ал.А., Цымбалов С.Д., Федяева В.Н., Григорьева Т.А., Трифонов Н.И.</i> Снижение эксплуатационных затрат в машинах камерного типа при термообработке пилопродукции.....	325
<i>Хрусталева И.В.</i> Методика силового анализа нагрузок, действующих при профилировании древесины.....	331
<i>Януш С.Ю.</i> Сокращение потребления и производства объемов лесопродукции путем применения современных технологий.....	336
6. ПРОЧИЕ ВОПРОСЫ.....	346
<i>Авдонина А.Е.</i> Использование беспилотных технологий для создания цифровых карт лесосек и оптимизации транспортировки леса.....	346
<i>Авдонина А.Е., Коченгина О.Е., Чураков А.В.</i> Методы повышения устойчивости беспилотных летательных аппаратов к воздействию атмосферных осадков.....	353

<i>Дробко П.Д., Тепноев А.В.</i> Внедрение в производство установок автоматизированного контроля электромонтажа.....	360
<i>Кокорева С.В., Егорушкова З.И.</i> Оценка эффективности инвестиций в глубокую переработку древесины на базе лесопромышленных парков: сравнительный анализ моделей импортозамещения.....	368
<i>Коченгина О.Е., Куттеева М.А., Чураков А.В.</i> Автоматизация процессов мониторинга и управления производственными линиями с использованием роботизированных комплексов.....	375
<i>Сененкова И.И., Тепноев А.В.</i> Применение технологии цифровых двойников в повышении эффективности производственных систем....	380
<i>Чечиль В.В., Чечиль Е.В., Кацадзе В.А.</i> Отечественное мульчирующее оборудование: классификация, технические особенности и перспективы развития российского рынка.....	385
<i>Чечиль В.В., Чечиль Е.В., Козлова И.К.</i> Лесопильный станок «Мастер 2000-05»: технические характеристики, конструктивные особенности и эксплуатационные возможности.....	394
<i>Чечиль В.В., Чечиль Е.В., Козлова И.К.</i> Эволюция лесопильных рам для распиловки древесины: технико-технологический анализ развития за 100 лет.....	402

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СПРОСА НА ПРОДУКЦИЮ В ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

Антонова Т.С., Зинченко В.С.

Введение.

Прогнозирование спроса – важный элемент стратегического управления в любом секторе экономики. В лесопромышленном комплексе, где спрос на продукцию влияет на объемы производства, инвестиционные решения, логистику, экспортные потоки и финансовую устойчивость предприятий задача прогнозирования становится наиболее сложной. ЛПК охватывает широкий спектр продукции – от круглого леса до пиломатериалов, фанеры, целлюлозы и продукции глубокой переработки. Сезонность заготовки, экспорт продукции, строительство, логистика, госрегулирование влияет на спрос продукции. Эффективное прогнозирование помогает предприятиям оптимизировать производство, планировать запасы, оценивать риски и адаптироваться к быстро меняющейся внешней среде.

Цель работы – выполнить анализ методов, инструментов и практического применения прогнозирования спроса в лесопромышленном комплексе с учетом специфики отрасли.

Методы исследования.

В работе применяется системный подход, включающий теоретический анализ и классификацию методов прогнозирования.

Спрос в лесопромышленном комплексе неоднородный и зависит от вида продукции. Круглый лес и пиломатериалы всегда востребованы, так как используются в строительстве, мебельной промышленности. Фанера и ДСП применяются в мебельной промышленности и при внутренних отделочных работах. Целлюлоза и бумажная продукция используется в издательском бизнесе, упаковке. В последнее время повышенным спросом пользуются пеллеты и биотопливо, это связано с переходом на возобновляемые источники энергии и экологическими стандартами. На показатели спроса влияют внешнеэкономические факторы, такие как международная торговля, состояние строительного рынка, макроэкономические показатели [1]. Сложившаяся экономическая и политическая ситуация негативно влияет на спрос основных видов

продукции ЛПК, санкции, торговые квоты, отсрочки и налоги создают сложности при решении данной задачи.

Прогнозирование спроса – это процесс оценки будущего объема продаж на определенный период времени, который служит основой для принятия решений в области закупок, производства, складирования и транспортировки [2]. Для того чтобы сделать прогноз можно использовать классические методы прогнозирования и эконометрические методы. Классические методы делятся на количественные (скользящего среднего, экспоненциального сглаживания) и качественные (экспертные оценки, маркетинговые исследования). Для данных методов характерна простота, возможность учитывать тренды и сезонные колебания, но требуется большой объем данных, плохо ловят изменения рынка, могут быть не объективными. Эконометрические методы прогнозирования рассматривают спрос как функцию не только временных тенденций, но и влияния макроэкономических и отраслевых факторов. При использовании этих методов можно оценить вклад каждого фактора, прогнозировать изменение зависимостей в будущем. Недостатками является неполнота экономической модели и ошибки измерений. Для более точного прогноза требуется большое количество данных. Эконометрические методы особенно ценны, для среднесрочных прогнозов и анализа чувствительности спроса к внешним изменениям. С развитием технологий и вычислительных мощностей стало возможным использование машинного обучения и искусственного интеллекта. Эти инструменты позволяют обрабатывать большие объемы данных, выявлять скрытые закономерности и делать более точные прогнозы. Нейросети хорошо работают с временными рядами и способны учитывать нелинейные зависимости. Например, применение LSTM с мультисенсорной обработкой данных позволяет лучше учитывать сложные модели в спросе на лесопroduкцию при пересечении различных рынков [3]. При прогнозировании спроса в лесопромышленном комплексе целесообразно учитывать сезонность спроса на продукцию. В летний период спрос повышен из-за проведения строительных работ, в зимний период наблюдается замедление потребления продукции, но объемы заготовки и производства значительно выше, чем летом. Поэтому в любой модели нужно учитывать сезонную компоненту, что даст более точный прогноз. Лесные пожары, вспышки вредителей, ветровалы приводят к росту цен или сдерживают спрос в краткосрочной перспективе. Транспортная инфраструктура лесопромышленного комплекса, доступность сырья и стоимость транспортировки напрямую влияют на конечную стоимость продукции и на ее потребление.

Пандемия, политическая напряженность и санкции оказывают влияние на спрос. События последних лет изменили структуру рынка и объемы потребления лесопродукции. Так как внешний рынок реализации лесопродукции сильно изменился, произошло смещение на внутренний рынок потребления и это необходимо учитывать при адаптации прогнозов.

Регуляторные факторы, такие как экологическое законодательство, строительные нормы и правила, таможенно-тарифная политика, государственные инвестиционные программы напрямую оказывают влияние на спрос. Введение или отмена таможенных пошлин, наличие сертификатов по устойчивому лесопользованию, строительство социального жилья влияют на объемы потребления.

На практике, корректные качественные прогнозы спроса в лесопромышленном комплексе позволяют оптимизировать производственные мощности под реальные потребности рынка, управлять запасами на производстве, избегая дефицита и избыточных запасов, планировать инвестиции в расширение производства. Прогнозы используются для разработки новых инвестиционных проектов, для оценки влияния отраслевых и макроэкономических факторов, подготовки предприятий к кризисным ситуациям. При этом на качество прогноза влияют количество и качество данных для прогнозирования, изменение цен на сырье и готовую продукцию, продолжительность производственного цикла (сложные технологические процессы, большое количество транспортных операций, простои и ожидание) и запаздывание реакции на изменение спроса.

Для составления качественного прогноза спроса необходимо использовать системный подход, который учитывает особенности рынка лесопродукции, оценки профессиональных экспертов в данной области и анализ данных [4]. Учитывая цель прогноза, требуется определить горизонт планирования: краткосрочный, среднесрочный и долгосрочный, так как для разных горизонтов планирования используют разные модели. Одним из самых трудоемких этапов является сбор и подготовка данных для прогнозирования. Нужно собрать данные по реализации продукции (объемы, цены, клиенты), данные по запасам и отгрузкам, портфель заказов предприятия. Кроме того, нужно учесть процентные ставки, инфляцию, курсы валют, цену на рынке. Полученные данные анализируются, определяется тренд, сезонная составляющая, выполняется корреляционный и регрессионный анализ. Выбор метода прогнозирования зависит от горизонта планирования. Для краткосрочного прогноза можно использовать методы временных рядов, для среднесрочного –

эконометрические модели. При создании долгосрочного прогноза – трендовые модели и экспертные методы. Составляя прогноз спроса нужно учитывать, что цифровые модели не учитывают влияние всех факторов, поэтому используем экспертные оценки и анализ (PEST- анализ, SWOT-анализ) для корректировки прогноза. Подготовленный прогноз спроса нужно оценить, рассчитать ошибки прогнозирования (MAPE, TS), установить допустимый уровень ошибки, можно проверить прогноз на прошлых данных и оценить точность прогноза. Качественный прогноз является основой для принятия правильных управленческих решений, требующий регулярного пересмотра и обновления. При составлении прогноза часто не учитываются экспортные ограничения, используется только одна модель, прогноз для всех видов продукции, что увеличивает ошибки и снижает качество прогноза. Для улучшения прогноза требуется: учитывать данные по цепочке поставок (от лесосеки до конечного потребителя), использовать цифровые двойники предприятий ЛПК, совместно использовать количественные и качественные методы, учитывать изменения и адаптировать используемые модели.

Прогнозирование спроса в лесопромышленном комплексе имеет существенное прикладное значение, так как напрямую влияет на эффективность управления производственными, сбытовыми, логистическими и экономическими процессами. Точные прогнозы позволяют: оптимизировать планирование заготовки и переработки древесины, повышает эффективность управления запасами, рационализировать цепочки поставок, обосновывать управленческие и инвестиционные решения, а также обеспечивать устойчивое и экологическое лесопользование.

Результаты исследования.

В рамках исследования были выявлены особенности спроса по группам продукции лесопромышленного комплекса. Определены ключевые факторы, влияющие на спрос: макроэкономические, регуляторные, рыночные и природные. Типичными ошибками прогнозирования являются: применение единой модели для всех продуктов предприятия, отсутствие сценарного анализа, игнорирование экспортных ограничений. Для эффективного прогнозирования спроса в лесной отрасли нужно: интегрировать данные по всей цепи поставок, комбинировать количественные и качественные методы, регулярно обновлять прогнозы, применять сценарные подходы и использовать цифровые двойники.

Заключение.

Эффективное прогнозирование спроса является основой конкурентоспособности предприятий лесопромышленного комплекса. Для повышения точности прогнозов нужно учитывать специфику отрасли и ключевые факторы. Перспективным направлением в данной области является внедрение искусственного интеллекта, интернет вещей и блокчейна для обработки больших данных и моделирования. Качественный прогноз спроса позволяет оптимизировать производственные мощности, управлять запасами, более рационально организовывать логистические процессы, обосновывать инвестиционные решения, обеспечивая устойчивое лесопользование.

Библиографический список

1. Бурдакова Г.И., Бянкин А.С., Мешков А.С. Исследование регионального спроса на продукцию лесопромышленного комплекса в условиях внешних санкционных давлений // *π-Economy*, 2023. – Т. 16. – № 1. С. 98–113.
2. Ричард Б. Чейз, Ф. Роберт Джейкобз, Николас Дж. Аквилано. Производственный и операционный менеджмент; пер. с англ. О.А. Островской, О. Л. Пелявского. – Москва: Вильямс, 2007. – 1169 с.
3. Ян Ц., Чжан Ю. Улучшение прогнозирования трансграничной торговли лесоматериалами с помощью рекуррентной нейронной сети и объединения данных из нескольких источников // *Discov Artif Intell* 5, 342 (2025).
4. Сушко О.П. Прогнозная оценка развития лесного комплекса на основе эвристического метода // *Экономика, предпринимательство и право*. – 2023. – Том 13. – № 12. – С. 5849–5868.

Сведения об авторах

ФИО	Антонова Татьяна Степановна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	4581-5931
e-mail	antonova.stl@mail.ru

ФИО	Зинченко Валентин Сергеевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	valentin2004-2014@mail.ru

Аннотация

В статье выполняется анализ методов прогнозирования спроса на лесопромышленную продукцию с учетом особенностей отрасли. В работе рассматриваются применение классических, эконометрических и экспертных подходов, а также современные инструменты прогнозирования, с учетом влияния сезонности, внешних факторов и необходимости комбинировать модели.

Ключевые слова: прогнозирование спроса, лесопромышленный комплекс, лесопромышленная логистика, сезонность спроса, цепи поставок, слоистое основание.

УДК 630.654

Разделы рубрикатора ГРНТИ 06.81.61

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕЛЛЕТ И БРИКЕТОВ В КАЧЕСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ БЫТОВОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ В КРАСНОДАРСКОМ И СТАВРОПОЛЬСКОМ КРАЯХ

Городецкий Ю.А., Ларкин Р.В., Кацадзе В.А.

Введение.

В условиях перехода к устойчивой экономике и необходимости обеспечения энергетической безопасности регионов особую актуальность приобретает вопрос эффективного и экологичного использования местных топливных ресурсов. Краснодарский и Ставропольский края, обладая

высоким, но не повсеместным уровнем газификации, демонстрируют устойчивый спрос на альтернативные виды твердого топлива для бытовых нужд. В отдаленных, горных и труднодоступных населенных пунктах, где подключение к магистральному газу экономически или технически нецелесообразно, традиционно используются дрова и уголь. Однако современные технологии позволяют перерабатывать отходы агропромышленного и лесоперерабатывающего комплексов в высокоэффективные и стандартизированные виды биотоплива – пеллеты и брикеты.

Цель работы – сравнительный анализ современных видов биотоплива для определения их энергетической эффективности, технологических особенностей производства и оценки перспектив применения в качестве альтернативного источника энергии для бытового потребления в регионах с неполной газификацией, на примере Краснодарского и Ставропольского краев.

Методы исследования.

Для достижения поставленной цели в работе был применен комплекс методов исследования, основанных на анализе актуальных данных, технических спецификаций и региональных особенностей.

Результаты исследования.

Первым этапом исследования стал анализ уровня газификации. Результаты показали, что, несмотря на высокие средние показатели, в Краснодарском крае остаются неохваченными газом отдалённые сельские и горные населённые пункты в Мостовском, Отрадненском, Апшеронском, Туапсинском районах, а также посёлки в районе Большого Сочи. В Ставропольском крае проблема наиболее остро стоит в восточных и северо-восточных районах (Арзгирский, Левокумский, Нефтекумский и др.), а также в многочисленных разрозненных хуторах. Эти территории, где проживает постоянное или сезонное (рекреационное) население, формируют стабильный локальный спрос на альтернативные виды топлива для отопления и приготовления пищи.

На основе сопоставления ключевых параметров была построена классификация и оценка перспектив различных видов топлива (табл. 1).

Табл. 1. Классификация и потенциал применения бытового биотоплива

Вид топлива	Теплотворность	Зольность	Ключевое применение	Потенциал в регионе
Древесные брикеты	4,500–5,100 ккал/кг	0.1–1%	Печи, камины, бани, котлы	Очень высокий. Универсальный заменитель дров.
Древесные пеллеты	~4.8–5.3 кВт*ч/кг	0.5–0.7%	Автоматические котлы	Нишевый, стабильный. Зависит от автоматизации.
Торрефицир. пеллеты/брикеты	21–22 МДж/кг	0,5–0,7%	Премиум-сегмент, влажный климат	Растущий нишевый. Технология будущего.
Древесный уголь	4,400–4900 ккал/кг	1,5–2,5%	Приготовление пищи (гриль)	Массовый, стабильный. Культурно обусловлен.

В контексте бытового отопления древесные брикеты обладают максимальным потенциалом благодаря универсальности, удобству и длительному горению. Пеллеты являются оптимальным, но специализированным решением для автоматизированных систем. торрефицированная продукция представляет собой премиальное топливо с особыми свойствами.

Исследование технологий позволило выявить следующие фундаментальные различия. Производство стандартных пеллет представляет собой отработанную цепочку: подготовка сырья → сушка (<12%) → измельчение → прессование под высоким давлением с выделением лигнина → охлаждение. Ключевым для качества является контроль влажности и чистота сырья.

Производство торрефицированного топлива включает дополнительный энергоемкий этап мягкого пиролиза (нагрев до 200–330°C без доступа кислорода). Этот процесс разрушает гигроскопичную гемицеллюлозу, частично карбонизирует лигнин и целлюлозу, что приводит к повышению теплотворности на 20–25% и приобретению гидрофобных свойств.

Система менеджмента качества (СМК) является критическим отличием сертифицированной продукции (ENplus, DINplus). Она включает постоянный лабораторный контроль, документирование всех этапов и

прослеживаемость партий, что гарантирует стабильность параметров, недостижимую для «обычных» пеллет.

Итоговое сопоставление (табл. 2) демонстрирует сферы конкурентоспособности каждого вида топлива.

Табл. 2. Итоговое сравнение пеллет и брикетов для бытового применения

Критерий	Пеллеты	Брикеты
Основное назначение	Автоматические системы отопления	Ручная загрузка в печи, камины, котлы
Ключевое преимущество	Полная автоматизация, минимальное обслуживание	Длительное и ровное горение, универсальность
Удобство использования	Идеальны для автоматики; для ручной закладки неудобны	Оптимальны для ручной закладки
Требования к хранению	Высокие (защита от влаги, пыление)	Умеренные (менее гигроскопичны)
Экономическая эффективность	Выше при использовании автоматики; дороже брикетов	Лучшее соотношение цены и качества для ручного отопления

Заключение.

Проведённое исследование позволяет сделать ряд научно обоснованных и практически значимых выводов.

Сформирован чёткий портрет целевых территорий. Установлено, что устойчивый спрос на биотопливо в Краснодарском и Ставропольском краях сконцентрирован в отдалённых сельских, предгорных и восточных районах, где централизованное газоснабжение отсутствует. Это создаёт основу для локализованного рынка.

Доказано технологическое превосходство стандартизированного биотоплива над традиционными дровами. Пеллеты и брикеты обладают в 1,5–2 раза более высокой удельной теплотворностью, низкой и стабильной влажностью (8–12% против 20–50% у дров), минимальной зольностью (0,5–1% против 1–5% и выше) и углеродной нейтральностью.

Выявлены чёткие сферы доминирования различных видов топлива. Для условий исследуемых регионов:

Древесные брикеты являются оптимальным решением для подавляющего большинства домохозяйств, нуждающихся в ручном отоплении. Они сочетают высокую энергоэффективность, удобство, длительность горения и наилучшее экономическое соотношение.

Древесные пеллеты представляют собой специализированное решение для ниши автоматизированного котельного оборудования, где их главная ценность заключается не в теплотворности, а в возможности полной автоматизации процесса.

Торрефицированные пеллеты и брикеты, обладая уникальными свойствами (гидрофобность, повышенная до 22 МДж/кг энергоемкость), являются топливом будущего и премиум-сегментом, перспективным для использования в прибрежных зонах с высокой влажностью и для логистически сложных проектов.

Установлено, что качество конечного продукта определяется системой контроля. Для потребителя критически важно ориентироваться не на общее название «пеллеты», а на наличие сертификата соответствия жёстким стандартам (ENplus, DINplus), который гарантирует стабильность заявленных характеристик и безопасность эксплуатации оборудования.

Практические рекомендации, вытекающие из исследования:

Для региональных властей и инвесторов: стимулирование развития локальных производств качественных древесных брикетов из отходов лесопереработки.

Для потребителей в неподключённых населённых пунктах: при выборе системы отопления отдавать предпочтение оборудованию под брикеты как наиболее сбалансированному и независимому варианту; переход на пеллеты обоснован только при готовности к значительным первоначальным инвестициям в автоматическую котельную.

Для научного и бизнес-сообщества: продолжение исследований в области оптимизации технологии торрефикации с целью снижения её себестоимости, что откроет массовый доступ к топливу с характеристиками, приближенными к углю.

Таким образом, биотопливо в форме пеллет и брикетов представляет собой не нишевый, а стратегически важный элемент обеспечения энергетической устойчивости и экологичности децентрализованного теплоснабжения южных регионов России.

Библиографический список

1. *Терещенко К.* Уровень газификации Краснодарского края // KUBAN.AIF.RU. URL: <https://kubnews.ru/obshchestvo/2025/07/15/uroven-gazifikatsii-krasnodarskogo-kraya-dostig-88-kuda-v-2025-godu-pridet-goluboe-toplivo/?ysclid=mmyr79degg734275778> (дата обращения 20.03.2026).

2. *Алифирова Е.В.* Газификация, Газораспределение // NEFTEGAS.RU URL: <https://neftegaz.ru/news/gazoraspredelenie/917330-za-5-let-gazprom-postroit-4-gazoprovoda-i-provedet-rekonstruktsiyu-15-grs-v-stavropolskom-kraye/> (дата обращения: 20.03.2026).

3. Технология производства пеллет // PELLET-PARK.RU URL: <https://pellet-park.ru/blog/tehnologiya-proizvodstva-pellet> (дата обращения: 20.03.2026).

4. Что лучше: пеллеты или брикеты? // PELLET-TEPLO.RU URL: <https://pellet-teplo.ru/blog/chto-luchshe-pellety-ili-brikety/?ysclid=mmyrtp5whg938940448> (дата обращения: 20.03.2026).

Сведения об авторах

ФИО	Городецкий Юрий Андреевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	yuragor@list.ru

ФИО	Ларкин Роман Вячеславович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	l4rkin.romain@yandex.ru

ФИО	Кацадзе Владимир Аркадьевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	3205-0333
e-mail	tlzp@mail.ru

Аннотация

В статье проведен сравнительный анализ современных видов биотоплива для бытового потребления в Краснодарском и Ставропольском краях с учетом территорий, не подключенных к газу. Результаты исследования могут быть использованы для обоснования развития локального производства биотоплива и повышения энергоэффективности децентрализованного теплоснабжения в южных регионах России.

Ключевые слова: биотопливо, пеллеты, брикеты, газификация, Краснодарский край, Ставропольский край.

УДК 62-662.5

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.43.99

К ВОПРОСУ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ ВИБРАЦИОННОМ КОРЧЕВАНИИ ПНЕЙ

Добрынин Ю.А., Михитаров А.Р.

Введение.

Корчёвка пней является важнейшим технологическим процессом для эффективного ведения цикла лесохозяйственных работ, обеспечивающая подготовку почвы при лесовосстановлении и строительства лесных дорог, а также служит источником ценного сырья – пневого осмола и целлюлозы. Свидетельством этого являются многочисленные исследования по созданию эффективной техники для корчёвки за рубежом.

Причина использования вибрационного воздействия при корчёвке объясняется низким уровнем энергозатрат, сочетающихся с простотой

воздействия, но требует создания специальных машин, оборудованных захватным устройством со специальным технологическим оборудованием.

Максимальная эффективность такой операции достигается при соблюдении определённых условий, позволяющих усилить воздействие вибрации именно на корневой массив уже заготовленного дерева.

При разработке технологического оборудования для корчёвки пней с применением вибрации необходимо иметь данные предварительного расчёта его параметров. В перечень таких параметров входят частота вибрационного воздействия и максимальная сила возмущения.

В исследованиях процесса корчевания рассматривались разные типы вибрационного воздействия – продольное, крутильное, поперечное и прочие [1]. Здесь рассматривается продольное вибрационное воздействие, осуществляемое гусеничной машиной с манипулятором, оснащённым захватным устройством с вибраторами.

Цель работы – определение зависимости частоты вибрационного возмущения от диаметра корчущего пня, обеспечивающего достижение минимальных энергозатрат.

Методика исследования.

В основу работы над установлением параметров технологического процесса вибрационного корчевания пней была принята формула частоты возмущающей силы продольных колебаний, соответствующая парциальной частоте двухмассовой динамической модели системы [2, 3], расчётная схема которой показана на рисунке 1.

$$p = \sqrt{\frac{(C+k)}{m_1}}. \quad (1)$$

Данная формула учитывает жёсткость и массу почвенно-корневой системы (ПКС) и параметр жёсткости манипулятора. Но переменной величиной из них является только жёсткость корневого массива, так как параметры манипулятора остаются одинаковыми при корчёвке пней деревьев всех диаметров, в рамках, ограниченных его техническими возможностями.

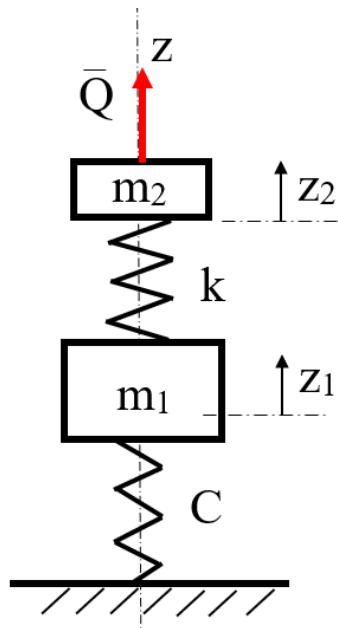


Рис. 1. Расчетная схема:

m_1, m_2 – приведённые массы ПКС и звена манипулятора;
 C, k – приведённые коэффициенты жёсткости корневого массива и манипулятора; z_1, z_2 – обобщённые координаты системы «Машина - ПКС»; $\bar{Q}$ – возмущающая сила

Для установления зависимости между частотой возмущения и диаметром ствола дерева корчущего пня необходимо массовые и жесткостные параметры корневого массива выразить через величину диаметра ствола.

Жёсткость корневого массива складывается из жёсткости корневой системы дерева и жёсткости массива почвогрунта, аналогично определяется и его масса. Для перехода к расчёту этих параметров необходимо привести систему к математической модели корневой системы и массива почвогрунта. Согласно исследованиям [4], корневую систему пня (дерева) можно представить в виде единого горизонтального корня формы усечённого конуса. В определённой степени его размеры сводятся к определению его радиусов оснований и высоты, а далее цилиндру с усреднённым радиусом, влиянием вертикального корня можно пренебречь.

Полученная формула жёсткости корневой системы при продольных колебаниях, установленная в исследовании [4], будет следующей:

$$c_1 = \frac{8E_1J_z}{l^3}, \quad (2)$$

где E_1 – модуль упругости дерева;

J_z – момент инерции поперечного сечения цилиндра;

ℓ – длина горизонтальных корней.

Длина горизонтальных корней рассчитывалась из уравнения:

$$l = \frac{1,1a}{1 + \frac{b}{cD}}, \quad (3)$$

где a , b и c – коэффициенты, учитывающие почвенные условия и породу дерева, для района Северо-Запада Российской Федерации относительно сосны, примем $a = 13,4$; $b = 4,45$; $c = 0,057$.

Форму корневого массива сосны можно условно принять [5] как фигуру шарового сегмента. Рассчитав его объём, с учётом найденной длины горизонтальных корней (3), найдём форму эквивалентного цилиндра для удобства дальнейших расчётов.

Далее можно определить жёсткость массива почвогрунта:

$$c_2 = \frac{E_2 S}{1,25H}, \quad (4)$$

где E_2 – модуль упругости почвогрунта;

S – площадь поперечного сечения цилиндра почвогрунта;

H – глубина залегания корней.

Суммарная эквивалентная жёсткость почвенно-корневой системы определяется как жёсткость системы последовательно соединённых пружин:

$$C = \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2}. \quad (5)$$

Приведённую жёсткость манипулятора [4] примем $k = 1,38 \cdot 10^6$ Н/м.

Масса корневого массива определяется по найденным объёмам корневой системы и массива почвогрунта с учётом их плотности.

Результаты исследования.

Таким образом, используя полученные значения и подставляя их в формулу (1), можно определить частоту возмущения при продольном корчевании пней разных диаметров. Полученные данные представлены в табл. 1.

Табл. 1. Параметры компонентов системы при продольном
вибрационном корчевании сосны

Диаметр ствола, на высоте 1,3 м, D, м	Жёсткость корневого массива, C, МН/м	Жёсткость манипулятора, k, МН/м	Масса корневого массива, кг	Оптимальная частота возмущения, p, рад/с
0,24	1,48	1,38	2,37	34,75
0,32	4,96		2,97	46,23
0,40	11,56		3,60	59,95
0,44	16,18		3,96	66,80
0,48	21,19		4,28	72,63

По полученным и представленным в табл. 1 данным построена зависимость оптимальной частоты возмущения от диаметра ствола дерева корчующего пня (рис. 2).

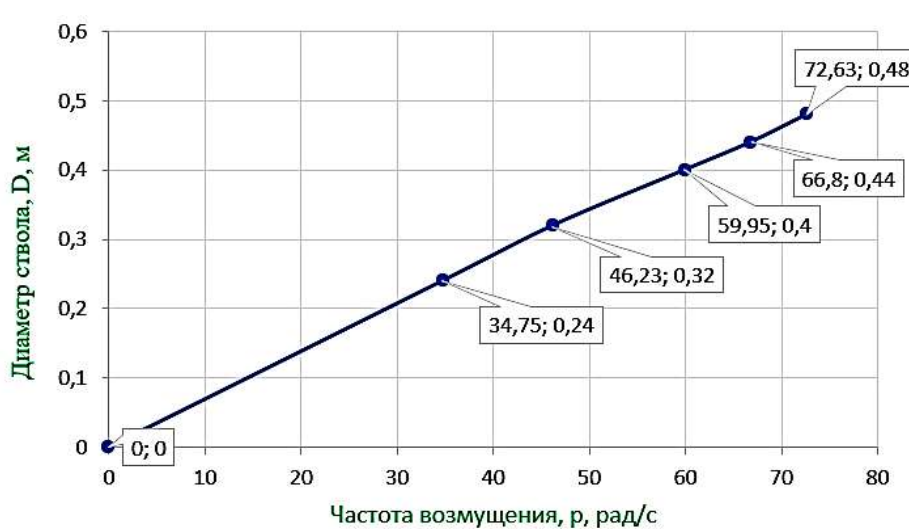


Рис. 2. Зависимость частоты вибрационного воздействия от диаметра корчующего пня сосны

Заключение.

Анализ полученной зависимости показывает ее практическую линейность, указывающую на то, что частота возмущения возрастает пропорционально увеличению диаметра корчующего пня.

При таком подборе частоты возмущения конструкция манипулятора фактически не испытывает вибрационной нагрузки.

Для других пород деревьев рассмотренная зависимость также будет сохраняться линейной, отличаясь лишь коэффициентом пропорциональности, так как формула (1), определяющая значение частоты, характеризует свойства парциальной системы, которую представляет рассматриваемая динамическая модель технологического процесса корчевания пней.

Библиографический список

1. Скальский М.У. Исследование процесса корчевальных работ машинами виброударного действия: дис. ... канд. техн. наук: 05.00.00. – Львов: Укр. с.-х. акад, 1967. – 275 с.

2. Михитаров А.Р., Добрынин Ю.А. Совершенствование технологического оборудования лесохозяйственной машины с манипулятором для корчевания с применением вибрации // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2024. – № 247. – С. 252–263.

3. Добрынин Ю.А. К вопросу выбора параметров вибрационного воздействия в технологическом процессе корчевания пней и отдельных деревьев // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2024 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2025. – С. 17–23.

4. Михитаров А.Р. Совершенствование параметров технологического процесса вибрационного корчевания пней и деревьев: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: специальность 4.3.4 «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины». – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2024. – 184 с.

5. Аболь П.И. Исследование сопротивляемости деревьев корчеванию: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: специальность 05.420 «Машины, механизмы и технологии лесоразработок, лесозаготовок и лесного хозяйства». – Москва: МЛТИ, 1969. – 265 с.

Сведения об авторах

ФИО	Добрынин Юрий Андреевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	5526-1250
e-mail	dobryninua-ltu@mail.ru

ФИО	Михитаров Александр Рафаилович
Организация	Ухтинский государственный технический университет
Адрес организации	169300, ул. Первомайская, д. 13, Республика Коми, г. Ухта, Россия
SPIN-код	5951-3541
e-mail	maxfkx@yandex.ru

Аннотация

На основе анализа проведенного исследования и его обобщения установлены основные факторы, влияющие на выбор частоты вибрационного воздействия на пень при его корчевании, а также установлена зависимость частоты от диаметра корчуемого пня.

Ключевые слова: вибрационное корчевание, пень, жесткость корневого массива, технологический процесс, динамическая модель, частота воздействия.

УДК: 630*377

Разделы рубрикатора ГРНТИ: 66.17.15, 66.17.99

ПЕРСПЕКТИВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ РАЗВИТИЯ ПЛАНТАЦИОННЫХ НАСАЖДЕНИЙ В РФ С ЦЕЛЮ ПОЛУЧЕНИЯ БИОМАССЫ С ЗАДАННЫМИ СВОЙСТВАМИ

Ларкин Р.В., Городецкий Ю.А., Кацадзе В.А.

Введение.

С середины XX столетия человечество стало потреблять лесоматериалы почти вдвое активнее. На этом фоне наблюдается устойчивое снижение объема легкодоступных лесных ресурсов. В частности, на территории России более половины (55%) лесопокрытых территорий относятся к разряду экономически нерентабельных для освоения. Вдобавок к этому, все больше лесов резервируется для рекреационных целей, что еще больше ограничивает промышленную вырубку и провоцирует сырьевой голод. В этих условиях ключевым инструментом покрытия дефицита выступают лесные плантации.

Цель работы – определить оптимальные схемы посадок деревьев на плантационных насаждениях с целью получения максимального объема биомассы древесины на минимальной площади за минимальное время.

Методы исследования.

Аналитический анализ открытых источников по перспективным возможностям интенсификации использования плантационных насаждений с целью получения биомассы древесины с заданными свойствами.

Результаты исследования.

Под лесными плантациями подразумеваются специально заложенные насаждения, чей рост и развитие подчинены задачам интенсивного лесовыращивания. Они ориентированы на ускоренное получение целевого сырья, что делает их экономически выгодными в условиях ограниченности естественных ресурсов.

Главное различие между искусственными лесными массивами и дикой природой заключается в их антропогенном происхождении. Человек закладывает такие плантации на заранее подготовленных участках, используя либо посев семян, либо высадку саженцев. Как правило, для этих целей выбираются земли, вышедшие из сельскохозяйственного оборота, территории, восстановленные после добычи полезных ископаемых (карьеры), или участки бывших вырубок. Приоритетом здесь является не поддержание экологического баланса или рекреация, а форсированное получение древесины с заданными параметрами.

Такие насаждения служат сырьевой базой для множества отраслей. В их числе – производство целлюлозы и бумаги, лесопиление, изготовление композитных материалов (древесно-стружечных, ориентированно-стружечных и волокнистых плит), а также сектор биоэнергетики (выпуск топливных гранул и щепы). Кроме того, на плантациях культивируют особые виды сырья, например, натуральный каучук, живицу (из которой получают скипидар и канифоль), орехи и фрукты, а также выращивают деревья к новогодним праздникам.

Технология рубок на искусственно выращенных лесных массивах кардинально отличается от заготовки в дикой природе. По своей сути этот процесс напоминает уборочную кампанию в агропромышленном комплексе, тогда как освоение естественных лесных угодий ближе к промыслу (собирачеству). Основная экономическая задача плантационного выращивания – максимизация выхода биомассы с заранее прогнозируемыми качественными показателями. Соответственно, при проведении рубок приоритет смещается в сторону наиболее полного и рентабельного изъятия этой биомассы при одновременной минимизации издержек.

Интенсивность и уровень механизации таких работ значительно выше, чем в обычном лесу, что обеспечивает высокий выход ценного сырья с каждого гектара. Экономическая логика диктует и подход к подбору пород: на плантациях целесообразно культивировать монокультуры. Однородность древостоя позволяет удовлетворить конкретные запросы переработчиков, избегая при этом сложной и дорогостоящей сортировки лесоматериалов, а также исключая появление неликвидных остатков, которые пришлось бы утилизировать или реализовывать себе в убыток.

Плантационное лесовыращивание дает существенное преимущество при последующей рубке благодаря возможности изначально упорядочить насаждения. В отличие от хаотичного естественного леса, здесь можно заранее спроектировать геометрию рядов и шаг посадки. Это позволяет оптимизировать расположение деревьев под конкретные параметры машин, что значительно повышает эффективность механизированной заготовки.

Управление продуктивностью лесной плантации и рентабельностью лесозаготовок начинается с выбора пространственной конфигурации посадок. Критически важными регулируемыми характеристиками здесь выступают густота размещения деревьев и схема их расположения на участке.

Классификация пространственных конфигураций лесных культур включает прямоугольную, рядовую, контурную, шахматную и комбинированную (смешанную) посадку. Последние три разновидности

ввиду их узкой специализации и трудоемкости реализации исключены из дальнейшего рассмотрения в рамках данного исследования.

Наиболее простой и часто встречающейся конфигурацией считается прямоугольная (в частном случае – квадратная). При данном подходе шаг посадки в ряду приравнивается к ширине междурядий, например, 2×2 м, $2,5 \times 2,5$ м или 3×3 м. Главные достоинства такой схемы – несложность закладки и сбалансированное поступление к растениям света и элементов питания. Однако при проведении рубок с применением колесных машин данное размещение создает определенные неудобства и снижает эффективность проходов.

Для достижения максимальной производительности колесной техники на лесозаготовках была разработана рядовая схема. По сути, она представляет собой модификацию прямоугольной, но с увеличенными промежутками между рядами (например, 1×4 м, $1,5 \times 3$ м, 1×7 м, 3×6 м). Благодаря этому уже на этапе создания плантации формируются постоянные технологические коридоры, а ширина междурядий изначально привязана к габаритам конкретных машин. Такая конфигурация может предусматривать как однорядное, так и сдвоенное (двухрядное) размещение посадочных мест. В настоящее время эта схема доминирует при использовании сортиментного метода заготовки древесины [1].

Рассмотрим, как меняются параметры древостоя при использовании описанных выше схем и их разновидностей (табл. 1).

Анализ лесозаготовительной техники показывает, что наиболее распространенные машины имеют габариты $\leq 3,1$ м в ширину. Считается, что для обеспечения оптимальной работы лесозаготовительной машины ширина технологического коридора должна составлять не менее двойной ширины машины. Следовательно, стоит выбирать схемы с шириной технологического коридора не менее 6 м.

В обозримой научной литературе отсутствуют универсальные модели продуктивности, охватывающие все многообразие схем посадки. Тем не менее, удалось обнаружить исследование [2], в котором сопоставлялась эффективность двух типов размещения деревьев – квадратного и рядового. С использованием имитационного моделирования (платформа EFIMOD) авторы проанализировали, как различается продуктивность березовых насаждений при одинаковой густоте (2500 экз./га), но разной геометрии посадки: 2×2 м и 1×4 м. Полученные данные сведены в табл. 2.

Табл. 1. Конфигурации посадок и их ключевые параметры

№ п/п	Схема	Расстояние, м		Густота, шт./га	Площадь питания одного дерева, м ²
		Между рядами	Между деревьями		
Квадратный тип схемы					
1	2 × 2	2	2	2500	4
2	2,5 × 2,5	2,5	2,5	1538	6,25
3	3 × 3	3	3	1111	9
Рядовая с одним рядом					
4	1 × 3	3	1	3333	3
5	1 × 4	4	1	2500	4
6	1 × 5	5	1	2000	5
7	1 × 6	6	1	1666	6
8	1 × 7	7	1	1428	7
Рядовая с двумя рядами (расстояние между попарно сближенными рядами 1 м)					
9	1 × 3	3	1	6666	1,5
10	1 × 4	4	1	5000	2
11	1 × 5	5	1	4000	2,5
12	1 × 6	6	1	3333	3
13	1 × 7	7	1	2857	3,5

Табл. 2. Основные таксационные показатели древостоя при разных схемах 30-летних плантаций при имитационном моделировании

Таксационные показатели	Схема посадки, м	
	2 × 2	1 × 4
Густота, шт./га	833	1647
Запас, м ³ /га	43,4	153,4
Средний диаметр на высоте 1,3 м, см	10,3	12,7
Средняя высота, м	11,3	13,5

Результаты данного исследования показывают, что при рядовой схеме 1 × 4 все показатели выше, чем при квадратной схеме 2 × 2. Особенно важно, что запас древесины при рядовой схеме, более чем в три раза выше, чем при квадратной.

Как было сказано ранее, отсутствуют модели, показывающие таксационные показатели для каждой схемы, но можно предположить, что при любой другой рядовой схеме показатели будут выше, чем при квадратной с аналогичной густотой при посадке.

Помимо конфигурации посадки, на продуктивность влияет плодородность почвы. Экспериментально определена устойчивая зависимость между содержанием в грунте органических и минеральных веществ и такими параметрами, как прирост древостоя, формирование корневой системы и накопление определенных компонентов в биомассе. Существуют работы, которые показали, что этот фактор можно эффективно регулировать. Предложена технология выпуска экологических и малозатратных органоминеральных удобрений, сырьем для которых служат осадки сточных вод (ОСВ) с очистных сооружений. Их применение в лесных питомниках и на плантациях позволяет не только ускорять рост, но и управлять компонентным составом древесины – например, добиваться нужных показателей содержания целлюлозы. Это открывает дополнительные возможности для промышленного использования древесины и восстановления лесных массивов.

Основными отраслями, в которых традиционно используют биомассу, полученную с лесосырьевых плантаций, являются целлюлозно-бумажная промышленность, производство древесных плит, строительство, топливная промышленность и энергетика, производство тары и упаковки. Однако данную биомассу можно также использовать для производства искусственного волокна из целлюлозы – вискозы. Сейчас в России отсутствует производство вискозы, хотя в советский период было два таких предприятия.

Ежегодные объемы выработки вискозы в мире оцениваются в диапазоне 6-7,6 млн тонн. Российская Федерация, не имеющая собственного производства данного вида волокна, полностью зависит от внешних поставок. По информации маркетинговых агентств, совокупный годовой спрос внутри страны составляет порядка 25-30 тыс. тонн. В 2023 году, например, импорт вискозного волокна в РФ достиг 26 тыс. тонн [3] – эта величина практически эквивалентна реальному потреблению на внутреннем рынке.

Возрождение в России производств данного профиля видится не только целесообразным, но и отвечающим текущим экономическим задачам. Однако запуск таких мощностей имеет смысл лишь при условии опоры на передовые технологические платформы. В комплекс приоритетных требований к модернизации входят: культивирование сырья

с прогнозируемыми параметрами (прежде всего с контролируемым составом целлюлозы), внедрение замкнутых или малоотходных технологических схем и, как один из критических факторов, оснащение предприятий современными системами глубокой очистки сточных вод.

Заключение.

Конкретная схема посадки на лесосырьевых плантациях должна выбираться с учетом выбранных машин и технологии заготовки, но имитационные эксперименты показывают, что применение рядовых схем посадки позволит наиболее эффективно использовать площадь лесосырьевых плантаций для получения максимального объема биомассы, в сравнении с квадратными схемами.

Библиографический список

1. *Ширнин Ю.А., Ширнин А.Ю.* Влияние пространственного размещения деревьев на плантациях на технологические параметры выборочных рубок // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. – Т. 26. – № 5. – С. 83-92.

2. *Припутина И.В., Фролова Г.Г., Быховец С.С., Шанин В.Н., Лебедев В.Г., Шестибратов К.А.* Моделирование продуктивности лесных плантаций при разных схемах пространственного размещения деревьев // Математическая биология и биоинформатика, 2016. – Т. 11. – № 2. – С. 245-262.

3. Анализ рынка вискозного волокна в России и в мире: спрос будет расти за счет замещения синтетических волокон. URL: https://eng.megaresearch.ru/new_reality/analiz-rynka-viskoznogo-volokna-v-rossii-i-v-mire-spros-budet-rasti-za-schet-zamescheniya-sinteticheskikh-volokon (дата обращения 20.03.2026).

Сведения об авторах

ФИО	Ларкин Роман Вячеславович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	l4rkin.romain@yandex.ru

ФИО	Городецкий Юрий Андреевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	yuragor@list.ru

ФИО	Кацадзе Владимир Аркадьевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	3205-0333
e-mail	tlzp@mail.ru

Аннотация

В статье определены возможные схемы посадки деревьев на плантационных насаждениях с целью наиболее эффективного получения биомассы древесины в минимальные сроки на минимальной площади.

Ключевые слова: Плантационные насаждения, схемы посадки, вискоза, конфигурации посадки.

УДК 630*238

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.01.99

ТЕРРИТОРИАЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ ПЕЛЛЕТНЫХ ПРОИЗВОДСТВ ЭВОЛЮЦИОННЫМ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Мотовилов Г.К., Тюрин Н.А.

Введение.

В современном мире, где ресурсы становятся все более ограниченными, а логистика усложняется [1], задачи оптимизации территориального размещения производственных мощностей приобретают

особенно важное значение. Это утверждение в полной мере относится к сектору пеллетного производства, где эффективность работы предприятий напрямую зависит от их расположения относительно источников сырья и потребителей продукции, а также от необходимой транспортной инфраструктуры. В условиях, когда конкуренция на рынке усиливается, а требования к качеству и скорости поставок растут, правильное размещение производств становится ключевым фактором, способствующим устойчивому развитию.

К сожалению, традиционные методы математической оптимизации, используемые для решения задач, связанных с нелинейными, многомерными и многоэкстремальными целевыми функциями, часто сталкиваются с трудностями. Они могут оказаться в «ловушке» локальных оптимумов, что приводит к получению субоптимальных решений, которые не удовлетворяют требованиям современных реалий. Это особенно актуально для задач, связанных с размещением производственных мощностей, где необходимо учитывать множество факторов, таких как доступность сырья, транспортные издержки и потребности рынка.

Цель работы.

Целью данного исследования является разработка и апробация комбинированного подхода к решению задачи оптимального размещения пеллетных заводов в заданном регионе.

Методы исследования.

Включают в себя как количественные, так и качественные подходы. Количественные методы в разработанной автоматизированной системе позволяют провести математическое моделирование и оптимизацию, в то время как качественные методы помогают глубже понять контекст и специфику региона. Это сочетание методов обеспечивает более полное и всестороннее изучение проблемы оптимального размещения производственных мощностей.

Результаты исследования.

Разработанная комбинированная методика была успешно протестирована на конкретной практической задаче, связанной с оптимизацией размещения предприятий, занимающихся производством древесных топливных пеллет по критерию гравитационного предпочтения на примере Новгородской области [2]. Для преодоления ограничений, присущих классическим градиентным методам, в данной статье предлагается последовательное применение двух алгоритмов. На первом этапе используется эволюционный метод [3], который осуществляет глобальный поиск области, близкой к глобальному оптимуму, при этом

игнорируя локальные «впадины» целевой функции. Это позволяет значительно расширить область поиска и избежать попадания в «ловушки», которые могут затруднить дальнейшую оптимизацию. На втором этапе применяется метод обобщенного приведенного градиента (ОПГ), который, используя найденное приближение в качестве стартовой точки, быстро и с высокой точностью определяет финальное оптимальное решение, минимизируя суммарные транспортные издержки.

Практическая значимость данной работы подтверждается тем, что расчеты были реализованы в среде MS Excel. Это делает методику доступной, наглядной и применимой для целей отраслевого анализа, территориального планирования без необходимости использования специализированного и дорогостоящего программного обеспечения. Такой подход позволяет не только улучшить понимание процессов, происходящих в сфере биоэнергетики, но и предоставляет инструменты для более эффективного управления ресурсами. Основной целью этой апробации стало не только подтверждение работоспособности предложенного подхода, но и оценка его чувствительности к изменениям входных параметров модели, а также получение конкретных, количественно обоснованных результатов, которые могут быть использованы для дальнейшего анализа и принятия решений.

Процесс моделирования был организован эвристическим алгоритмом в несколько итеративных этапов, каждый из которых отражал постепенное уточнение условий задачи.

Первый этап – глобальный поиск решений с использованием эволюционного метода. На этом первом этапе основная задача заключается в том, чтобы исследовать обширное пространство решений, охватывающее все возможные районы и условные точки размещения, с целью нахождения одного или нескольких перспективных решений. Для реализации этого процесса в Excel необходимо открыть диалоговое окно «Поиск решения» и выбрать опцию «Эволюционный поиск решения».

Второй этап - локальная оптимизация с применением метода ОПГ. На этом этапе цель состоит в том, чтобы использовать найденное на предыдущем этапе решение, полученное с помощью эволюционного метода, в качестве начального приближения для быстрой и точной локальной оптимизации. В Excel, в той же модели, где сохранены значения переменных, необходимо изменить метод в «Поиске решения» на «Нелинейный метод обобщенного приведенного градиента (ОПГ)».

Первый этап (рис.1.) включал в себя базовый сценарий, в рамках которого была рассмотрена конфигурация, учитывающая не только

сырьевые потоки внутри Новгородской области, но и крупнейшего потенциального потребителя готовой продукции — агломерацию Санкт-Петербурга. Для достижения этой цели был применен эволюционный алгоритм, который позволил провести глобальный поиск оптимальных решений с последующим уточнением результатов с использованием метода оптимизации по градиенту (ОПГ). В результате этого подхода удалось определить оптимальное расположение трех производственных объектов.

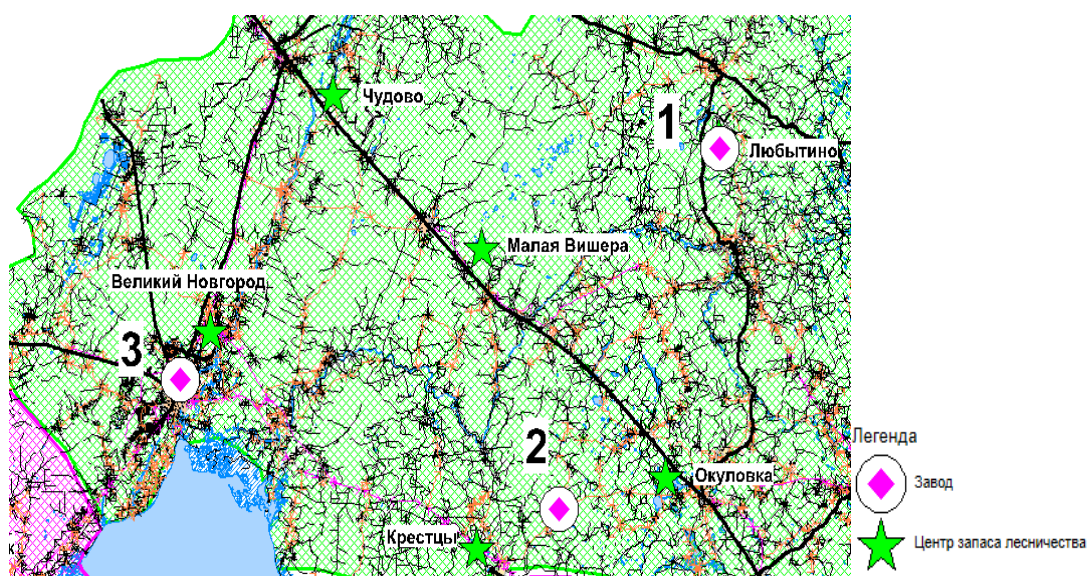


Рис. 1. Результаты первого этапа поиска размещения пеллетных производств с использованием эволюционного метода в Новгородской области

Критерий оптимизации – показатель предпочтения после первого этапа равен 106,98. Координаты заводов: Завод №1: $X = 6520666,324$; $Y = 6540671,302$; Завод №2: $X = 6484684,797$; $Y = 6471171,968$; Завод №3: $X = 6399758,961$; $Y = 6495984,338$. Мощность заводов соответственно №1 - 19 тыс. тонн в год, №2 - 12 тыс. тонн в год, №3 - 9 тыс. тонн в год.

На втором этапе локальной оптимизации (рис.2.), применяется метод обобщенного приведенного градиента (ОПГ), который, используя найденное приближение в качестве стартовой точки, определяет финальное оптимальное решение, минимизируя суммарные транспортные издержки. Будучи градиентным методом, в окрестности оптимума сходится к нему очень быстро, уточняя решение до требуемой точности за несколько итераций. Показатель предпочтения после второго этапа равен 161,60. Координаты заводов: Завод №1: $X = 6520666,333$; $Y = 6540671,308$; Завод №2: $X = 6484684,795$; $Y = 6471171,967$; Завод №3: $X = 6399758,872$; $Y =$

6495984,712. По сравнению с первым этапом координаты изменились не значительно, а показатель предпочтения вырос на 51,06% за счет изменения оптимальной мощности заводов соответственно: №1 - 24 тыс. тонн в год, №2 - 19 тыс. тонн в год, №3 - 9 тыс. тонн в год.

Эволюционный метод, игнорируя локальные "впадины" в целевой функции, нашел район вблизи крупных источников сырья и потребителей продукции, который был использован как стартовая точка для метода обобщенного приведенного градиента (ОПГ).

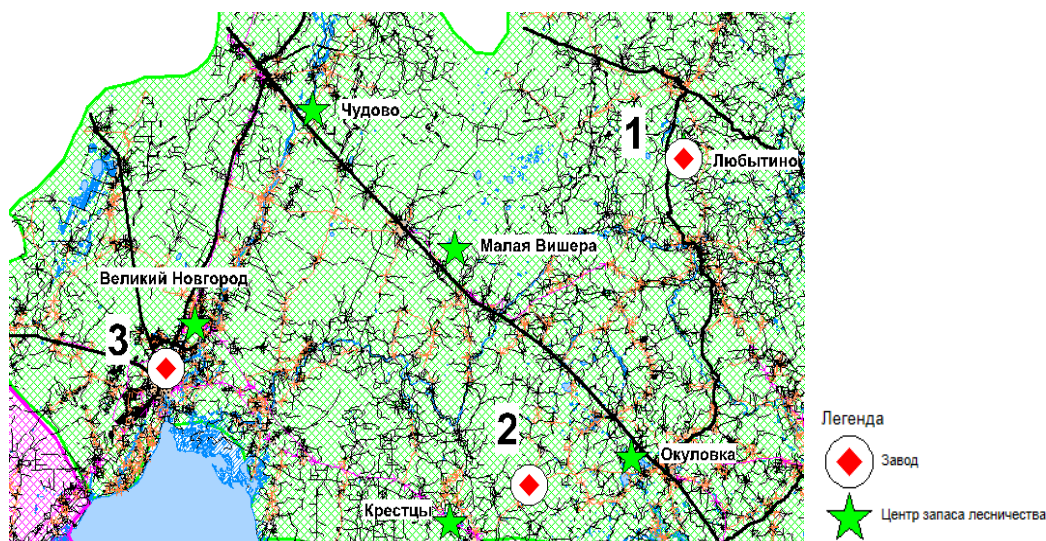


Рис. 2. Результаты второго этапа поиска размещения pelletных производств методом обобщенного приведенного градиента в Новгородской области

Апробированная методика автоматически скорректировала первоначальное решение, предложив новый показатель предпочтения. Этот результат наглядно иллюстрирует чувствительность модели к изменениям входных данных и ее способность перераспределять мощности заводов, зоны их сырьевого обеспечения и потребления продукции. Таким образом, эволюционный метод эффективно сужает область поиска, после чего ОПГ быстро и точно находит точку локального оптимума. Комбинация методов повышает уверенность в том, что найденный локальный оптимум методом ОПГ является глобальным.

Заключение.

Комбинирование эволюционного метода и метода ОПГ является целесообразным и эффективным для задач территориального планирования сложных производств. Данный подход сочетает в себе робастность (устойчивость к сложной форме целевой функции) первого метода и

точность второго, что соответствует требованиям научного исследования, направленного на выработку практических рекомендаций. Применение предложенного комбинированного метода для модели размещения пеллетного производства в заданной области позволило преодолеть проблему локальных оптимумов. Реализация методики в широкодоступном инструменте MS Excel повышает ее прикладную ценность и воспроизводимость для целей отраслевого анализа и бизнес-планирования.

Библиографический список

1. Орехов А. Топливные гранулы не находят сбыта // Коммерсантъ, 22.12.2025. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/8312191> (дата обращения: 08.01.2026).

2. Мотовилов Г.К., Тюрин Н.А. Методология использования гравитационной модели для оптимизации размещения пеллетных производств // ЛТА-СПбГЛТУ в мировом научно-образовательном пространстве. Научные традиции и современные научные и технические достижения: материалы VI научно-практической конференции преподавателей, аспирантов и магистрантов СПбГЛТУ имени С.М. Кирова. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2024. – С. 77-81.

3. Мотовилов Г. К., Тюрин Н. А. Оптимизация размещения новых предприятий пеллетных производств методом гравитационной модели // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы XXIII Международной научно-технической конференции (Вологда, 3–4 декабря 2025 г.). – Вологда: Вологодский государственный университет, 2025. – С. 177-180.

Сведения об авторах

ФИО	Мотовилов Глеб Константинович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5, Литер У, Россия
SPIN-код	1725-3427
e-mail	ziber71@gmail.com

ФИО	Тюрин Николай Александрович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5, Литер У, Россия
SPIN-код	8998-5234
e-mail	tnalif@mail.ru

Аннотация

В данной статье рассматривается применение эволюционного метода математической оптимизации и метода обобщенного приведенного градиента (ОПГ) как инструмента принятия решений при размещении предприятий по переработке древесных отходов в топливно-энергетические ресурсы.

Ключевые слова: методы математической оптимизации, эволюционный метод, метод обобщенного приведенного градиента, производство топливных гранул, комбинированная методика.

УДК: 630*6

Разделы рубрикатора ГРНТИ: 68.01.29

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ МАЛОГО ЛЕСНОГО БИЗНЕСА В РЕСПУБЛИКЕ КАРЕЛИЯ

Науман А.И., Романов С.В.

Введение.

Лесопромышленный комплекс исторически является системообразующей отраслью экономики Республики Карелия, формируя значительную долю промышленного производства и экспортного потенциала региона. Однако геополитические изменения последних лет привели к разрыву устоявшихся хозяйственных связей и закрытию традиционных европейских рынков сбыта, что поставило отрасль перед беспрецедентными вызовами. Если крупные вертикально-интегрированные структуры обладают определенным запасом прочности, то малый лесной

бизнес оказался в наиболее уязвимом положении. Под малым лесным бизнесом в данном исследовании понимаются микропредприятия и малые предприятия, занятые в сфере лесозаготовки, первичной и вторичной переработки древесины, производства готовых изделий, а также сборе недревесных лесных ресурсов.

Цель работы – на основе анализа эмпирических данных и конкретных примеров предприятий Республики Карелия проанализировать текущее состояние малого лесного бизнеса, выявить системные проблемы его функционирования и оценить перспективы развития в условиях новой экономической реальности.

Методы исследования.

В основе методологии работы лежит комплексный подход, сочетающий анализ количественных и качественных показателей функционирования малых лесопромышленных предприятий. Информационную базу составили открытые данные ЕГРЮЛ и ЕГРИП, официальные сообщения органов государственной власти региона (Министерство природных ресурсов и экологии РК, Корпорация развития РК), материалы специализированных отраслевых изданий («Леспром», «Лесной комплекс») и региональных информационных агентств.

Результаты исследования.

Лесной сектор Карелии переживает период структурной перестройки. Долгое время ориентированный на экспорт в Европу, сегодня он вынужден искать новые пути развития [1]. В этих условиях роль малого бизнеса становится особенно важной, так как именно он способен гибко реагировать на изменения рыночной конъюнктуры, осваивать новые ниши и удовлетворять локальный спрос.

Анализ открытых источников и реестров позволяет выделить несколько основных профилей деятельности, которые сегодня осваивает малый лесной бизнес Карелии. Исследователи КарНЦ РАН отмечают, что потенциал использования леса в биоэкономике пока задействован не в полной мере, а малые предприятия сталкиваются с проблемами неэффективного доступа к сырью [2].

Первый и наиболее традиционный профиль – лесопиление и производство строительных материалов. Классическим представителем этого направления является индивидуальный предприниматель Сергей Викторович Беляев, зарегистрированный в Олонецком районе. Анализ выписки из ЕГРИП показывает, что бизнес не ограничивается простым производством пиломатериалов: предприниматель также занимается производством деревянных конструкций, оптовой и розничной торговлей,

строительством зданий и грузоперевозками. Это свидетельствует о диверсификации, позволяющей удерживаться на плаву и предлагать клиентам комплексные услуги [3].

Второе, гораздо более перспективное направление – глубокая переработка и производство готовой продукции. Здесь наиболее показателен пример петрозаводской компании ООО «Экоформат». Эта компания представляет собой образец успешной трансформации от простого переработчика к производителю высокомаржинальной продукции. В 2026 году при поддержке Корпорации развития Республики Карелия и Администрации Петрозаводска «Экоформат» завершает масштабный инвестиционный проект по модернизации мебельного производства. Объем инвестиций в проект составил 38,5 млн рублей. Эти средства направлены на создание современного предприятия по выпуску мебели для офиса, дома и торгового оборудования. Планируемая мощность – 1000 комплектов продукции в год, что позволит создать 7 новых рабочих мест. Генеральный директор компании Михаил Федоров отмечает, что ключевым фактором успеха стало эффективное взаимодействие с властями, которое помогло решить сложные земельно-имущественные вопросы и получить правовую основу для строительства. Этот кейс демонстрирует, что малый бизнес в Карелии способен не просто выживать, но и инвестировать в развитие, переходя от полукустарного производства к индустриальному [4].

Еще один яркий пример адаптации к новым рыночным условиям – проект ООО «Арктическая Лесная Корпорация» в Костомукше. Это предприятие, которое начнет работу в конце 2026 года, ориентируется исключительно на внутренний рынок и продукцию, отвечающую современным потребительским трендам. Компания займется производством деревянных домов, бань, беседок, садовых качелей и мебели. Особый упор планируется сделать на изготовление слэбов – широких спилов древесины, которые ценятся в дизайне интерьеров за свою уникальность и натуральность. Инвестиции в проект составляют около 39 млн рублей, и он позволит создать 10 рабочих мест в арктической зоне республики. Плановый объем производства – от 100 до 1000 кубометров готовой продукции в год. Генеральный директор Владислав Егоров подчеркивает, что предприятие будет выпускать высококачественную продукцию из местного сырья. Этот проект показателен тем, что бизнес делает ставку на потребительские качества товара, а не на его сырьевую ценность.

Приведенные примеры демонстрируют широкий спектр деятельности малых предприятий. Однако существуют и менее очевидные, но важные направления, такие как использование леса в биоэкономике (сбор дикоросов, рекреация), потенциал которых, по мнению исследователей КарНЦ РАН, пока используется не в полной мере [2].

Несмотря на позитивные примеры, малый лесной бизнес Карелии сталкивается с рядом системных проблем, которые сдерживают его развитие и ставят под угрозу само существование многих игроков.

Одной из острейших проблем является доступ к лесосырьевым ресурсам. По данным Министерства природных ресурсов и экологии Карелии, в последние годы в республике наблюдается устойчивое падение освоения расчетной лесосеки, что напрямую ведет к снижению выпуска готовой продукции [1]. Ключевая причина – высокие ставки платы за заготовку древесины. Как отмечает вице-премьер правительства Карелии Янина Свидская, в республике одни из самых высоких ставок среди всех субъектов Северо-Западного федерального округа [5]. Они установлены федеральным постановлением и не учитывают текущую экономическую ситуацию, в которой рентабельность лесозаготовки резко упала. Для малого бизнеса, который не обладает эффектом масштаба, эти ставки становятся неподъемным бременем, делая экономически нецелесообразным освоение переданных в аренду участков.

Вторая группа проблем связана со сбытом продукции. Закрытие европейского рынка, который был основным для карельских пиломатериалов, привело к необходимости срочной переориентации на Восток и внутренний рынок. Однако этот процесс сопряжен с огромными сложностями. Транспортные издержки при отправке продукции в Китай по железной дороге или через дальневосточные порты многократно возросли, нивелируя всю потенциальную прибыль [6]. Малый бизнес часто просто не имеет доступа к этим логистическим цепочкам, которые зарезервированы под крупные корпорации. Негативные последствия этих процессов хорошо иллюстрируют данные о падении производства в отдельных сегментах. Например, производство топливных гранул (пеллет), которое активно развивалось именно малыми и средними предприятиями в расчете на европейский «зеленый» рынок, в 2023 году рухнуло на 90,7% [7].

Сочетание высоких издержек и проблем со сбытом приводит к снижению рентабельности и уходу с рынка слабых игроков. К сожалению, не все малые предприятия находят в себе силы адаптироваться. Примером может служить ООО «Эко Карьяла» из Петрозаводска, занимавшееся сбором и заготовкой пищевых лесных ресурсов. Несмотря на

перспективность ниши, компания столкнулась с трудностями и находится в процессе ликвидации. Это указывает на то, что даже в относительно новых сегментах рынка малый бизнес сталкивается с проблемами сбыта, сертификации или доступа к сырью, которые становятся критическими [3].

В сложившихся условиях выживание и развитие малого лесного бизнеса невозможно без активной государственной поддержки, которая в Карелии реализуется по нескольким направлениям.

На федеральном и региональном уровнях разработаны механизмы поддержки инвестиционных проектов. Как показано на примере ООО «Экоформат» и ООО «Арктическая Лесная Корпорация», ключевую роль играет Корпорация развития Республики Карелия [4]. Она помогает инвесторам на всех этапах – от подбора участка и оформления земельно-правовых отношений до подключения к инженерным сетям. Успех этих проектов стал возможен благодаря эффективному государственно-частному партнерству.

Кроме того, в регионе действуют программы финансовой поддержки. Согласно распоряжению Правительства Республики Карелия от 28 января 2025 года, на государственную поддержку малого и среднего предпринимательства в 2026 году предусмотрено выделение более 80 млн. руб. [8]. Эти средства направляются на создание и развитие промышленных парков и технопарков в рамках федерального проекта «Малое и среднее предпринимательство». Такие площадки могли бы стать точками роста для малых лесных предприятий, предоставляя им готовую инфраструктуру и снижая барьеры для входа.

Региональные власти активно лоббируют на федеральном уровне снижение ставок арендной платы за лесные участки. Это предложение, озвученное Яниной Свидской на совещании в Национальном центре «Россия» в январе 2026 года, напрямую направлено на поддержку арендаторов, включая малый бизнес [5]. Снижение ставок позволило бы предприятиям высвободить средства для развития и более активно осваивать расчетную лесосеку.

Показателен опыт 2023 года, когда на территории СЗФО действовал понижающий коэффициент к арендной плате для арендаторов-лесоэкспортеров и переработчиков. Как сообщила Янина Свидская, в Карелии этой льготой воспользовались 18 лесопользователей, получив поддержку на общую сумму порядка 385 млн рублей. Важно, что все эти компании продолжают работу до сих пор, что доказывает высокую эффективность данной меры [1]. Республика предлагает возобновить эту

практику, что стало бы мощным стимулом для развития малых предприятий, занимающихся экспортом и глубокой переработкой.

Анализ проектов ООО «Арктическая Лесная Корпорация» и ООО «Экоформат» показывает, куда смещается фокус малого бизнеса. Основной вектор – удовлетворение внутреннего спроса, причем спроса качественного, на продукцию с высокой добавленной стоимостью [9]. В Карелии, где деревянное домостроение исторически популярно, а туристический кластер активно развивается, спрос на качественные деревянные дома, элементы благоустройства и интерьера будет только расти.

Заключение.

Малый лесной бизнес в Республике Карелия переживает сложный, но необходимый этап трансформации. Старая модель, основанная на экспорте круглого леса или первичных пиломатериалов в Европу, безвозвратно ушла в прошлое. Как показывают примеры ИП Беляева С.В., ООО «Экоформат» и ООО «Арктическая Лесная Корпорация», будущее сектора – за гибкостью, диверсификацией и глубокой переработкой, ориентированной на конечного потребителя.

Основными проблемами остаются высокие издержки на всех этапах – от аренды лесосек до логистики, а также общая финансовая нестабильность, которая вымывает с рынка слабых игроков [3]. Однако наличие действенных мер государственной поддержки, включая финансовую помощь через Корпорацию развития и инициативы по снижению арендных ставок, дает малым предприятиям шанс не только выжить, но и найти новые точки роста. Перспективы развития малого лесного бизнеса Карелии напрямую связаны с его способностью к адаптации, умелым использованием инструментов господдержки и ориентацией на растущий внутренний рынок качественной деревянной продукции.

Библиографический список

1. *Кобалинский М.В., Шишацкий Н.Г.* Направления модернизации механизмов развития регионального лесного комплекса // Структурная модернизация как фактор повышения конкурентоспособности региона (на примере Красноярского края): монография / отв. ред. Н.Г. Шишацкий. – Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2020. – Гл. 4.4. – С. 172-185.

2. *Бабенко Т.И., Блам Ю.Ш.* Защищённость лесного комплекса России в новых институциональных и экономических условиях // Угрозы и защищённость экономики России: опыт оценки: монография / отв. ред. С.В.

Казанцев, В.В. Карпов. – Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2016. – Гл. 6. – С. 202-232.

3. *Ахмадеева М.М., Мочаева Т.В.* Финансово-экономические основы государственного управления лесами : учебное пособие. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2020. – 102 с.

4. *Ибиев Г.З., Быков А.А., Гамидов А.Г. [и др.]*. Экономика лесного хозяйства и управление лесными ресурсами: учебник. – Москва: ООО «Издательский дом «Зама», 2025. – 298 с.

5. *Гамсахурдия О.В., Назаренко Е.Б.* Экономика и организация в лесном комплексе: практикум. – Москва: Научные технологии, 2024. – 141 с.

6. *Загидуллина Л.И.* Организация предпринимательской деятельности в лесном комплексе: учебник. – 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург: Лань, 2020. – 140 с.

7. В Карелии падает освоение расчетной лесосеки // Леспром: отраслевой портал, 29.01.2026. URL: <https://www.lesprom.com> (дата обращения: 10.03.2026).

8. Распоряжение Правительства Республики Карелия от 28.01.2025 № 47р-П «О распределении средств бюджета Республики Карелия на государственную поддержку малого и среднего предпринимательства в субъектах Российской Федерации на 2026 год» // Кодекс: электронный фонд правовых документов. URL: <http://www.kodeks.karelia.ru> (дата обращения: 10.03.2026).

9. Резидент Арктики планирует запуск производства деревянных изделий в Костомукше // Министерство экономического развития Республики Карелия: официальный сайт, 26.11.2025. URL: <https://economy.gov.karelia.ru/news/26-11-2025-rezident-arktiki-planiruet-zapusk-proizvodstva-derevyannykh-izdeliy-v-kostomukshe/> (дата обращения: 10.03.2026).

Сведения об авторах

ФИО	Науман Анита Ивановна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	anita.naumanr@bk.ru

ФИО	Романов Семен Викторович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	semrom-2000@mail.ru

Аннотация

В статье рассматривается современное состояние малого предпринимательства в лесопромышленном комплексе Республики Карелия в условиях трансформации рынков сбыта и логистических цепочек. Цель работы – на основе анализа конкретных предприятий выявить ключевые проблемы сектора и оценить перспективы его развития. Исследование базируется на данных ЕГРЮЛ/ЕГРИП, материалах Корпорации развития Карелии, официальных заявлениях органов власти и отраслевых изданий. В статье подробно разобраны примеры компаний ООО «Экоформат», ООО «Арктическая Лесная Корпорация», ООО «Лес ПТЗ», а также опыт индивидуальных предпринимателей. Особое внимание уделено анализу мер государственной поддержки и их эффективности. Сделан вывод о переходе малого лесного бизнеса республики от экспортно-сырьевой модели к модели, ориентированной на внутренний спрос и глубокую переработку.

Ключевые слова: лесопромышленный комплекс, малый бизнес, Республика Карелия, глубокая переработка древесины, государственная поддержка.

УДК 630*6:338.242

Разделы рубрикатора ГРНТИ 68.01.75

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Потапов Ю.А., Угрюмов С.А.

Введение.

Лесопромышленный комплекс (ЛПК) является одной из ключевых отраслей России. Современные лесозаготовительные и деревообрабатывающие предприятия характеризуются высокой степенью автоматизации производственных процессов. Они требуют не только периодического обслуживания и ремонта, но и стабильного и качественного электроснабжения.

Как показывает анализ современных исследований, тенденцией повышения эффективности ЛПК является внедрение систем предиктивного обслуживания и цифровизации [1]. Однако, работа таких систем, от сбора данных с датчиков вибрации, температуры в рабочей зоне, давления рабочих жидкостей, токопотребления до их передачи в облачные платформы, полностью зависит от надежности электроснабжения. Специфика работы лесных машин (работа в условиях бездорожья, отдалённых территорий) создает дополнительные трудности для точной работы навигационного и измерительного оборудования, усугубляя последствия перебоев с электроснабжением. Аварийные отключения источников электроэнергии, питающие лесопильные цеха, приводят к внезапным остановкам работы технологического оборудования. Это влечет за собой не только экономические потери от простоев, но и риск брака обрабатываемого сырья, поломки дорогостоящих частотно-регулируемых приводов и потери данных в системах автоматизации.

Целью работы является анализ и обоснование применения источников бесперебойного питания (ИБП) в системах электроснабжения предприятий ЛПК как эффективного инструмента повышения надежности и безотказности работы технологического оборудования.

Методы исследования.

Анализ литературных источников по вопросу бесперебойного питания в системах электроснабжения промышленных предприятий, классификация, систематизация и обобщение данных.

Результаты исследования.

Условия эксплуатации электрооборудования на предприятиях ЛПК имеют ряд проблем, негативно влияющих на надежность [1]:

1. Нестабильность внешнего электроснабжения. Многие лесозаготовительные участки и склады питаются от воздушных линий электропередачи большой протяженности, проходящих по лесным массивам. Это повышает риск аварийного отключения линии из-за падения деревьев, налипания мокрого снега или обледенения проводов.

2. Суровые условия окружающей среды. Оборудование часто эксплуатируется при экстремально низких температурах (до $-40...-50^{\circ}\text{C}$), высокой влажности и запыленности.

3. Высокая чувствительность современной техники. Электронные системы управления дизели харвестеров, контроллеры гидравлики и программируемые логические контроллеры лесопильных линий зависимы от стабильного напряжения электроснабжения. Внезапное отключение питания может привести к некорректному завершению цикла обработки сырья, что создает угрозу для травматизма и поломки инструмента.

Современное развитие элементной базы позволяет применять специализированные ИБП непосредственно в структуре электропитания лесных машин и стационарных объектов ЛПК. Классификация применения ИБП в ЛПК приведена в табл. 1.

Таблица 1. Классификация применения ИБП в ЛПК

Область применения	Примеры объектов / машин	Защищаемое оборудование	Ключевые особенности работы ИБП
Стационарные объекты	Лесопильные заводы, сушильные камеры	Асинхронные двигатели с ПЧ, системы автоматического позиционирования пил, сортировочные конвейеры	Режим онлайн для полной фильтрации искажений сети и обеспечения чистого синусоидального напряжения
Мобильные машины	Харвестеры, форвардеры	Бортовые компьютеры, системы навигации и телематики, контроллеры гидравлических систем	Работа от бортовой аккумуляторной батареи машины с гальванической развязкой и стабилизацией питания для чувствительной электроники

Анализ современного рынка силовой электроники показывает появление класса оборудования, специально разработанного для тяжелых условий эксплуатации. Для предприятий ЛПК представляют следующие технологии –свинцово-кислотные аккумуляторы (AGM/GEL). Они чувствительны к низким температурам, при -20°C их емкость значительно падает, а электролит может замерзнуть.

Альтернативой являются литий-железо-фосфатные аккумуляторы (LiFePO_4). Как показывают исследования, они обладают рядом преимуществ [2,3]:

- широкий диапазон рабочих температур (до $-20\ldots-30^{\circ}\text{C}$ и ниже со встроенным подогревом);
- высокая циклическая стойкость (более 6000 циклов заряда-разряда), что актуально при частых перебоях сети;
- высокая степень безопасности: устойчивость к тепловому разгону, механическим повреждениям и коротким замыканиям, что критически важно для лесной техники, работающей в условиях повышенной вибрации. Такие ИБП позволяют обеспечивать питание систем: сенсоров, контроллеров, освещения, что позволяет переждать длительную аварию на линии.

В ряде задач требуется не только автономный режим, а также корректное завершение работы. Например, при внезапном отключении питания частотного привода лесопильной рамы необходимо опустить пильный узел и остановить подачу, избежав заклинивания. Для таких целей оптимальны ИБП на основе суперконденсаторов (электрических двойных слоев). Их преимущества:

- практически неограниченный ресурс (более 500 000 циклов);
- полное отсутствие обслуживания;
- работа в экстремально широком диапазоне температур (от -40°C до $+65^{\circ}\text{C}$);
- высокая удельная мощность (способность отдать большой ток за доли секунды).

Суперконденсаторные модули, благодаря высокому классу защиты корпуса (IP67), могут быть установлены непосредственно на двигателе или редукторе конвейера.

Одним из требований к оборудованию ЛПК является защита от пыли и влаги. Пыль (опилки, кора) в сочетании с влагой является средой, вызывающей короткие замыкания и коррозию контактов. Современные промышленные ИБП выпускаются в герметичных алюминиевых корпусах со степенью защиты IP65 и выше. Это позволяет монтировать их

непосредственно вблизи исполнительных механизмов, не вынося в отдельные чистые помещения, что упрощает и удешевляет монтаж. Эффективность систем лесопромышленного оборудования напрямую зависит от качества и непрерывности сбора данных. Датчики, установленные на пилах, подшипниках, двигателях, постоянно передают данные о вибрации и температуре [4]. Сбой питания датчика или контроллера сбора данных приводит к потере важной информации, что нарушает алгоритмы работы и снижает точность прогноза остаточного ресурса.

Применение ИБП гарантирует, что система мониторинга продолжит работу даже при кратковременном отключении основного питания. Более того, наличие ИБП позволяет организовать корректное отключение или перевод системы в «спящий» режим с сохранением всех текущих параметров. Это особенно актуально для удаленных лесотехнических комплексов, где доступ сервисных инженеров затруднен.

Вывод.

Обеспечение надежности работы технологического оборудования ЛПК является комплексной задачей, включающей как совершенствование методов технического обслуживания, так и повышение надежности системы электроснабжения. Проведенный анализ показывает, что использование специализированных источников бесперебойного питания является необходимым и экономически оправданным решением.

Библиографический список

1. Гулин С.В., Пиркин А.Г. Системный анализ в энергетике агропромышленного комплекса // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета, 2022. – № 3 (68). – С. 121–130.
2. Сажнев А.М., Рогулина Л.Г. Источники бесперебойного электропитания переменного тока: учебное пособие. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. – 312 с.
3. Вихров М.Е., Кузнецова А.М., Егоров М.С. Особенности применения источников бесперебойного питания / Национальный исследовательский университет «МЭИ». – Москва: Изд-во МЭИ, 2022. – 50 с.
4. Беззубцева М.М., Волков В.С. Компьютерные технологии в научных исследованиях энергосистем. – Санкт-Петербург: СПбГАУ, 2017. – 75 с.

Сведения об авторах

ФИО	Потапов Юрий Александрович
Организация	Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
Адрес организации	196601, Санкт-Петербург, Пушкин, Петербургское шоссе, д. 2, Россия
SPIN-код	1973-5592
e-mail	navi-yura@mail.ru

ФИО	Угрюмов Сергей Алексеевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	6246-6269
e-mail	ugr-s@yandex.ru

Аннотация

В настоящее время основной тенденцией повышения эффективности лесопромышленного комплекса является внедрение систем предиктивного обслуживания и цифровизации. В данной работе проведен анализ и обоснование применения источников бесперебойного питания в системах электроснабжения предприятий лесопромышленного комплекса как эффективного инструмента повышения надежности и безотказности работы технологического оборудования. Рассмотрена классификация применения источников бесперебойного питания в лесной отрасли.

Ключевые слова: лесопромышленный комплекс, электроснабжение, источники бесперебойного питания, надежность работы оборудования.

УДК 630.3:658.26

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.01.84

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОДБОРЩИКА- ПАКЕТИРОВЩИКА ЛЕСОСЕЧНЫХ ОТХОДОВ JOHN DEERE 1490D

Абрамов Н.А., Угрюмов С.А.

Введение.

Согласно литературным данным [1,2] после вырубki древесины на лесосеках остается около 60-65% лесосечных отходов. В большинстве случаев данные отходы утилизируются путем нормативного контролируемого сжигания, или же остаются на дальнейшее перегнивание. Таким образом возникает проблема, как с экологической стороны, так и с противопожарной безопасности.

В настоящее время, в различных странах используют технологию комплексной заготовки древесных ресурсов. Данная технология заключается в том, что все отходы после вырубki лесосеки полезно используются с целью дальнейшего производства различной продукции, при этом сокращается фактор, влияющий на экологию и дальнейшее выделение углеродного следа.

Компания John Deere выпускает подборщики-пакетировщики лесосечных отходов. Это специализированные машины на базе форвардера, на технологическом модуле которых установлена пакетирующая установка для уплотнения и обвязки отходов.

Цель работы.

Целью работы является анализ конструктивных особенностей подборщика-пакетировщика лесосечных отходов от компании John Deere и расчет усилия захвата при выполнении технологических операций.

Методы исследования.

В работе проведен аналитический обзор конструктивных особенностей подборщика-пакетировщика лесосечных отходов от компании John Deere. На основе основных положений механики выполнен расчет усилия захвата при выполнении технологических операций.

Результаты исследования.

Подборщик лесосечных отходов John Deere 1490D – это навесное гидравлическое рабочее оборудование форвардера компании John Deere предназначен для сбора, захвата, уплотнения и погрузки лесосечных

отходов (вершин деревьев, сучьев, тонкомерного древесного сырья) образующие при заготовки леса [3].

Подборщик представляет собой грейферный механизм с формированием пакета, агрегатируемый с гидроманипулятором форвардера и работающей от его штатной гидросистемы. Конструкция обеспечивает формирование пакетов из лесосечных отходов в дальнейшем удобны для транспортировки. В табл. 1 представлены технические характеристики подборщика лесосечных отходов в составе форвардера John Deere 1490D.

Табл. 1. Технические характеристики подборщика лесосечных отходов John Deere 1490D

Показатель	Обозначение	Ед.изм.	Значение
Тип рабочего органа	-	-	Грейферный подборщик с формированием пакета
Функциональное значение	-	-	Сбор, уплотнение и погрузка лесосечных отходов
Базовая машина	-	-	форвардер John Deere 1490D
Тип привода	-	-	Гидравлический
Рабочее давление гидросистеме	P	МПа	20-25
Максимально допустимое давление	P	МПа	28
Расход рабочей жидкости	Q	Л/мин	60-90
Количество гидроцилиндров	n	шт	2
Диаметр поршня гидроцилиндра	D	мм	80-100
Ход штока гидроцилиндра	S	мм	450-600
Теоретические усилия захвата	F	кН	80-120
Максимальная ширина раскрытия захвата	B	мм	1800-2000
Рабочая ширина захвата	B	мм	1600-1900
Объем формируемого пакета	V	м ³	0,7-1,2
Масса подборщика	m	кг	450-650
Материал несущих элементов	-	-	Высокопрочная конструкционная сталь
Тип крепление к манипулятору	-	-	Адаптерное
Температура диапазона эксплуатации	T	°C	-40....+40
Наработка до капитального ремонта	L	-	10000м/ч

Получение параметры приведены на основании анализа серийных образцов подборщика лесосечных отходов, агрегируемых с форвардерами класса John Deere 1490D.

Основываясь на основных характеристиках и техническом процессе производство пакетов из лесосечных отходов была составлена конструктивная схема подборщика лесосечных отходов John Deere 1490D (рис. 1).



Рис. 1. Конструктивная схема подборщика лесосечных отходов John Deere 1490D

Каждый технологический узел отвечает за ряд технологических работ при формировании пакета из лесосечных отходов. Грейферный захват – рабочие челюсти, которые захватывают лесосечные отходы и формируют их в пакеты. Гидроцилиндры захвата – приводят в движение челюсти. Основная рама – несущая конструкция, к которой крепятся остальные элементы. Формирующая камера – ограничивает форму пакета, повышает плотность. Износостойкие кромки и направляющие – усиливают долговечность при работе с абразивным материалом. Адаптер крепления – узел сопряжения с манипулятором форвардера. Гидросистема – включает линии высокого давления, распределители и защитные клапаны, обеспечивает работу цилиндров.

Для расчета усилия захвата подборщика рассмотрим грейферный захват с двумя симметричными челюстями, приводимыми в действия двумя гидроцилиндрами двухстороннего действия. Каждая челюсть вращается относительно оси шарнира и передает усилия на формируемый пакет из лесосечных отходов.

Расчет усилия, развиваемого гидравлическим цилиндром:

$$F_{\text{ц}} = p \times A, \quad (1)$$

где $F_{\text{ц}}$ – усилие гидроцилиндра, Н; p – рабочее давление в гидросистеме, Па; A – площадь поршня гидроцилиндра, м².

Площадь поршня:

$$A = \frac{\pi D^2}{4}, \quad (2)$$

где D – диаметр поршня гидроцилиндра, м.

Суммарное усилия от двух гидроцилиндров:

$$F = n \times F_{\text{ц}}, \quad (3)$$

где n – количество гидроцилиндров, $n=2$.

Усилия захвата на челюстях определяется из условия равновесия момента относительно оси поворота челюсти:

$$F_3 \times l_3 = F \times l_{\text{ц}} \times \mu, \quad (4)$$

откуда:

$$F_3 = \frac{n \times p \times A \times l_{\text{ц}} \times \mu}{l_3}, \quad (5)$$

где F_3 – усилия захвата на материале, Н; $l_{\text{ц}}$ – плечо приложения силы гидроцилиндра, м; l_3 – плечо силы захвата (расстояние от оси шарнира до точке контакта с пакетом), м; μ – коэффициент механических потерь (0,85-0,9).

Далее необходимо подставить значение согласно характеристикам. Принятые значения сводим в табл. 2.

Табл. 2. Типовые значения расчета

Обозначение	Ед.изм	Значения
p	Па	25×10^6
D	м	0,09
n	-	2
l_3	м	0,75
$l_{ц}$	м	0,30
μ	-	0,9

Площадь поршня:

$$A = \frac{\pi \cdot 0,09^2}{4} = 0,00636 \text{ м}^2.$$

Усилия одного гидроцилиндра:

$$F = 25 \cdot 10^6 \cdot 0,00636 = 159000 \text{ Н}.$$

Суммарное усилие:

$$F_{\text{сумм}} = 2 \cdot 159000 = 318000 \text{ Н}.$$

Усилие захвата:

$$F_3 = \frac{318000 \cdot 0,30 \cdot 0,9}{0,75} \approx 114000 \text{ Н} \approx 114 \text{ кН}.$$

Вывод.

Полученное значение согласно расчетов усилия захвата обеспечивает надежность удержания и формирования пакетов из лесосечных отходов объемом до $1,2 \text{ м}^3$ и соответствует техническому уровню серийных подборщиков, агрегируемых совместно с форвардерами класса John Deere 1490D.

Библиографический список

1. *Патякин В.И., Салминен Э.О., Бит Ю.А. [и др.]. Лесозэксплуатация: учебник для студ. высш. учеб. заведений.* – Москва: Издательский центр «Академия», 2006. – 320 с.
2. *Матвейко А.П., Клоков Д.В., Протас П.А.* Технология и оборудование лесозаготовительного производства. – Минск: БГТУ, 2005. – 160 с.
3. *Кононович Д.А., Мохов С.П., Симанович В.А., Арико С.Е.* Анализ конструктивных особенностей машин для сбора лесосечных отходов // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность, 2016. – № 2(184). – С. 31-35.

Сведения об авторах

ФИО	Абрамов Никита Александрович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	5334-0024
e-mail	nikitabrams@mail.ru

ФИО	Угрюмов Сергей Алексеевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	6246-6269
e-mail	ugr-s@yandex.ru

Аннотация

В статье рассмотрены основные конструктивные особенности подборщика-пакетировщика лесосечных отходов компании John Deere 1490D. Выполнен расчет усилия захвата подборщика-пакетировщика при выполнении технологических операций.

Ключевые слова: форвардер, манипулятор, гидроцилиндр, отходы, захват, усилия захвата.

УДК 630*31:630*37

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.15.21

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИСТЕМЫ ИИ-УПРАВЛЕНИЯ БПЛА ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ СЪЁМКИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Белов С.В., Силецкий В.В.

Введение.

Контроль геометрических параметров и технического состояния автомобильных дорог требует регулярных измерений с высокой пространственной точностью. Применяемые в практике тахеометрические и GNSS-методы обеспечивают нормативную достоверность [1], однако характеризуются значительной трудоёмкостью, ограниченной производительностью и зависимостью от условий дорожного движения. Это затрудняет проведение оперативного мониторинга протяжённых участков.

Использование беспилотных летательных аппаратов расширяет возможности сбора пространственных данных, позволяя выполнять съёмку протяжённых объектов в автоматическом режиме [2,3]. Вместе с тем перенос измерений в аэрофотограмметрическую среду смещает акцент с процедуры измерения на обеспечение метрической корректности данных и их последующей обработки [4]. Получение большого объема изображений само по себе не гарантирует требуемой точности реконструкции и корректной интерпретации состояния покрытия [5].

Следовательно, задача состоит не только в автоматизации съёмки, но и в согласовании параметров полёта, фотограмметрической реконструкции и алгоритмов семантической обработки в рамках единой системы.

Цель работы - разработка концептуальной модели интегрированной обработки данных аэрофотосъёмки с БПЛА, обеспечивающей согласованное управление параметрами полётного задания, фотограмметрической реконструкции и нейросетевой семантической сегментации при обследовании автомобильных дорог.

Методы исследования.

Работа носит аналитико-методологический характер и основана на системном анализе существующих подходов к аэрофотограмметрической съёмке с БПЛА [2,4], методах трёхмерной реконструкции (SfM–MVS) [6] и алгоритмах семантической сегментации изображений на базе сверточных нейронных сетей [5,7].

В рамках исследования проведена концептуальная интеграция указанных технологий с формированием модели согласованного

управления параметрами съёмки и последующей обработки данных. Анализ выполнен с учётом требований к пространственному разрешению (GSD), геометрии перекрытия снимков и точности позиционирования [2,8]. Методика опирается на теоретические положения фотограмметрии, цифровой обработки изображений и алгоритмического моделирования траектории полёта БПЛА.

Результаты исследования.

Сверточные нейронные сети предназначены для обработки изображений и обеспечивают иерархическое извлечение пространственных признаков, устойчивых к локальным смещениям и искажениям [7]. Снижение размерности и вычислительной сложности достигается применением операций пулинга, преимущественно максимального, а нелинейные функции активации обеспечивают аппроксимацию сложных зависимостей.

Метод Structure-from-Motion (SfM) обеспечивает восстановление трехмерной структуры сцены и параметров ориентирования камер по набору перекрывающихся изображений [6]. Процесс включает детектирование и сопоставление ключевых точек, оценку геометрических соответствий с использованием робастных методов и совместную оптимизацию параметров ориентирования (bundle adjustment) с формированием разреженного облака точек [4]. На основе уточненной геометрии выполняется плотная реконструкция методом Multi-View Stereo (MVS). По результатам реконструкции формируются цифровая модель поверхности и ортофотоплан.

Обеспечение требуемой точности реконструкции определяется геометрией съёмки [4]. Для устойчивой фотограмметрической обработки задается продольное перекрытие 80–90 % и поперечное 60–70 % [2]. Планирование маршрута выполняется на основе границ участка, высоты полета и заданных параметров перекрытия с формированием параллельных траекторий съёмки.

Алгоритм функционирования системы включает планирование миссии, автоматическую съёмку, параллельную обработку данных и формирование производных продуктов [5].

Планирование выполняется на цифровой карте с заданием границ участка и целевого пространственного разрешения (GSD), на основе которого рассчитываются высота полета и параметры перекрытия [2]. Формируется сетка маршрутов с учетом геометрии трассы и ограничений безопасности; полетное задание загружается в контроллер БПЛА с проверкой RTK-позиционирования [8].

Съемка осуществляется в автоматическом режиме по заданной траектории с обеспечением требуемого продольного и поперечного перекрытия. Каждый снимок сопровождается координатами центра проекции и параметрами ориентации, записываемыми в метаданные.

Обработка реализуется в виде двух параллельных потоков. В первом выполняется фотограмметрическая реконструкция (SfM–MVS) с определением параметров ориентирования и построением плотного облака точек и производных моделей [6]. Во втором осуществляется пиксельная сегментация изображений сверточной нейронной сетью с последующей морфологической фильтрацией [7]. Маски сегментации проецируются на трехмерную модель, формируя семантически размеченное облако точек или сетку.

На основе интегрированной модели генерируются семантически фильтрованный ортофотоплан, цифровая модель поверхности дорожного полотна и автоматизированный отчет с количественными характеристиками дефектов и геометрических параметров покрытия [3,5].

Применимость системы определяется условиями съёмки и характеристиками сенсорного комплекса [2,8].

Фотограмметрическая обработка чувствительна к погодным и световым условиям. Осадки и капли на объективе делают изображения непригодными для обработки. Мокрое покрытие и блики снижают устойчивость алгоритмов SfM и семантической сегментации. Низкая контрастность уменьшает точность реконструкции [4].

Метод ограничен видимостью поверхности: плотная растительность приводит к пропускам в облаке точек и искажению модели рельефа [5]. Однородные текстуры асфальта затрудняют сопоставление ключевых точек и требуют увеличенного перекрытия. Движущиеся объекты вызывают артефакты ортофотоплана и искажения цифровой модели поверхности.

При частичной облиственности и в условиях недостаточной освещённости целесообразно применение LiDAR, обеспечивающего регистрацию рельефа под растительным покровом и независимость от солнечного освещения [5].

Заключение.

В статье обоснована концептуальная модель интегрированной обработки данных аэрофотосъемки, разрешающая противоречие между производительностью БПЛА и требованиями к метрической достоверности при обследовании автодорог. Ключевой результат – доказательство неразрывности трёх процессов: планирования параметров полёта, фотограмметрической реконструкции и нейросетевой семантической

сегментации. Показано, что именно их согласованное управление, а не автоматизация съёмки как таковая, обеспечивает переход от разрозненных изображений к семантически размеченной трехмерной модели покрытия. Установлено: связующим звеном выступают геометрические параметры съёмки, одновременно гарантирующие устойчивость SfM-алгоритмов и репрезентативность данных для обучения нейросети.

Теоретическая значимость работы – в системной интеграции методов SfM–MVS и сверточных сетей в единую методологическую рамку. В противовес традиционной последовательной обработке, обоснована взаимообусловленность реконструкции и интерпретации: качество фотограмметрической модели определяет достоверность проецирования семантических масок, а сегментационная фильтрация уточняет выделение геометрических параметров полотна. Тем самым понятие «высокоточная съёмка» с БПЛА дополнено обязательной семантической компонентой.

Практическая реализация подхода позволяет получать не ортофотопланы, а количественные отчёты с локализацией дефектов и привязкой размеров к реальной системе координат, исключая субъективизм визуальных инспекций. Формирование семантически размеченных цифровых двойников создает основу для автоматизированного анализа динамики износа и планирования ремонтных программ.

Ограничения связаны с жёсткими требованиями к условиям съёмки; на участках с древесной растительностью фотограмметрия уступает лидарному сканированию. Дальнейшее развитие предполагает исследование гибридных схем, сочетающих фотограмметрию с лазерным сканированием и инерциальными измерениями для сохранения производительности БПЛА в условиях сложного рельефа и залесенности.

Библиографический список

1. СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96; введ. 2017-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 82 с.
2. *Colomina I., Molina P.* Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014. – Vol. 92. – P. 79-97.
3. *Носков И.В., Носков К.И., Тиненская С.В., Ананьев С.А.* Дрон-технологии в строительстве-современные решения и возможности // *Вестник евразийской науки*, 2020. – Том 12. – С. 1-12.

4. Remondino F., Spera M.G., Nocerino E. [et al.] State of the art in high density image matching // The Photogrammetric Record, 2014. – Vol. 29, iss. 146. – P. 144-166.

5. Силецкий В.В., Белов С.В. Анализ применения беспилотных летательных аппаратов с элементами искусственного интеллекта в лесном дорожном строительстве // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: материалы XVII Международной научно-технической конференции. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2026. – С. 338–343.

6. Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F. [et al.] ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications // Geomorphology, 2012. – Vol. 179. – P. 300-314.

7. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015: 18th International Conference, Munich, Germany, October 5–9, 2015: proceedings. – Cham: Springer, 2015. – P. 234-241.

8. Лосев Д.М. Цифровые технологии дистанционного управления и контроля при производстве строительных работ // Вестник НИЦ «Строительство», 2024. – Т. 41, № 2. – С. 148-157.

Сведения об авторах

ФИО	Белов Сергей Витальевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	sergey454519@mail.ru
ФИО	Силецкий Вадим Витальевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	4495-0838
e-mail	lol.spairo@yandex.ru

Аннотация

Цель работы – разработка концептуальной модели интегрированной обработки данных аэрофотосъемки с БПЛА для высокоточного обследования автодорог. Методология основана на системном анализе и интеграции методов SfM–MVS фотограмметрической реконструкции и нейросетевой семантической сегментации. Ключевой результат – обоснование неразрывной связи между параметрами полетного задания, качеством трехмерной модели и достоверностью интерпретации дефектов покрытия. Сделан вывод о необходимости согласованного управления этими процессами для получения семантически размеченных цифровых двойников дорог. Теоретическая значимость работы заключается в преодолении разрыва между автоматизацией съёмки и метрической корректностью данных.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, лесные автомобильные дороги, фотограмметрия, семантическая сегментация, сверточные нейронные сети, высокоточная съемка.

УДК 528.7:625.711.84:004.8

Раздел рубрикатора ГРНТИ 66.17.15

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЕ ЦЕМЕНТОГРУНТОВ УКРЕПЛЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫМИ ВОЛОКНАМИ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ЛЕСНЫХ ДОРОГ

Бодров А.В., Силецкий В.В.

Введение.

Леса представляют собой один из ключевых экономических и экологических ресурсов, функционирование которых во многом зависит от развитой сети лесных дорог. Вопросы проектирования и ремонта таких дорог нашли отражение в работах Силецкого В.В. с соавторами [1,2], где рассматриваются особенности расчета дорожных одежд в различных грунтово-климатических условиях. Вместе с тем такие дороги эксплуатируются в условиях постоянного воздействия как транспортных нагрузок, так и неблагоприятных природных факторов, что обуславливает их ускоренное разрушение и необходимость регулярного ремонта.

К основным причинам неудовлетворительного состояния лесных дорог относятся следующие.

Во-первых, слабые грунты основания. На значительной части участков дороги возводятся на переувлажнённых, пучинистых и малопрочных грунтах (глины, суглинки, торф), не обеспечивающих требуемой несущей способности.

Во-вторых, климатические воздействия. Атмосферные осадки, а также циклы сезонного замерзания и оттаивания способствуют разрушению дорожной конструкции, вызывая эрозионные процессы, образование выбоин и развитие колеиности.

В-третьих, воздействие тяжелой лесозаготовительной техники. Харвестеры и форвардеры создают высокие удельные нагрузки на дорожное полотно, которые для традиционных грунтовых дорог нередко оказываются критическими.

Применяемые в практике методы ремонта – отсыпка гравием, укрепление местными материалами – в большинстве случаев носят временный характер, требуют регулярных затрат и не устраняют причин деградации конструкции. В связи с этим возникает необходимость внедрения более эффективных, долговечных и экономически обоснованных технологий ремонта лесных дорог.

Следует отметить, что традиционные подходы к реконструкции, ориентированные на формирование жёстких покрытий, не всегда обеспечивают требуемую долговечность в специфических условиях лесной инфраструктуры. Это обуславливает целесообразность применения принципиально новых композитных материалов, в частности цементогрунтов, армированных полимерными волокнами. Использование такого материала позволяет формировать относительно гибкое и трещиностойкое дорожное полотно с повышенными прочностными характеристиками, что делает его перспективным решением при реконструкции лесных дорог [3].

Цель работы – анализ и оценка целесообразности применения цементогрунтов, армированных полимерной фиброй, при ремонте и реконструкции лесных дорог.

Методы исследования.

В работе использованы методы теоретического анализа и обобщения научно-технической литературы и нормативных документов, посвящённых укреплению грунтов и применению цементогрунтов в дорожном строительстве. Проведен сравнительный анализ данных отечественных и зарубежных исследований, касающихся влияния полимерной фибры на прочностные и эксплуатационные характеристики цементогрунта.

Результаты исследования.

В настоящее время наиболее распространенным неорганическим вяжущим веществом, применяемым в дорожном строительстве, является портландцемент. Портландцемент представляет собой гидравлическое вяжущее, получаемое путем совместного помола цементного клинкера, гипса и минеральных добавок. В его составе преобладают силикаты кальция (70–80 %), которые в процессе гидратации формируют прочную кристаллическую структуру. При соблюдении требований к составу смеси это обеспечивает достижение нормативных показателей прочности и морозостойкости цементогрунта в соответствии с ГОСТ Р 70452–2022 [4].

Вместе с тем цементогрунты на основе портландцемента характеризуются повышенной жёсткостью и ограниченной трещиностойкостью. В условиях эксплуатации дорожных конструкций это способствует образованию продольных и поперечных трещин, что приводит к ухудшению эксплуатационного состояния покрытия и сокращению срока его службы. Образовавшиеся трещины также способствуют проникновению влаги и развитию последующих разрушений.

В связи с этим актуальной задачей является совершенствование составов цементогрунта, направленное не только на обеспечение требуемых прочностных и морозостойких характеристик, но и на повышение его трещиностойкости и долговечности.

Одним из эффективных способов решения данной задачи является дисперсное армирование, предусматривающее введение в состав смеси волокнистых компонентов – фибры [3,5,6]. Материал, получаемый в результате такого модифицирования, принято называть фиброцементогрунтом.

В качестве армирующего компонента значительный интерес представляют базальтовые волокна, обладающие высокой прочностью, стойкостью к воздействию низких температур и способностью ограничивать развитие трещин в структуре материала. Дополнительным преимуществом является их доступность, поскольку они могут являться побочным продуктом производства теплоизоляционных материалов.

Фиброцементогрунт представляет собой искусственный композиционный строительный материал, получаемый путем смешивания и уплотнения грунта, цемента, фиброволокон и воды в заданных соотношениях. Введение волокон способствует формированию более устойчивой к трещинообразованию структуры и повышению эксплуатационной надёжности материала.

Анализ работ Чудинова С.А. и др. [3,5,6] свидетельствует о высокой перспективности применения фиброцементогрунтов при реконструкции лесных автомобильных дорог. Вместе с тем сопоставление представленных в этих работах данных с требованиями ГОСТ 31108–2020 [7] позволило выявить отдельные расхождения в характеристиках используемых материалов и подходах к их оценке. Это указывает на необходимость дальнейших исследований, направленных на уточнение состава и свойств композиционных материалов, адаптированных к условиям эксплуатации лесных дорог.

В продолжение рассмотрения свойств и эксплуатационных характеристик фиброцементогрунтов целесообразно выделить ряд положений, подтверждающих эффективность их применения в конструкциях лесных дорог.

Повышение несущей способности и долговечности. По данным исследований, введение базальтовой фибры в количестве 3,5 % способствует увеличению прочности цементогрунта на сжатие до 15,6 %, что имеет принципиальное значение для восприятия динамических и ударных нагрузок от тяжелой лесозаготовительной техники, включая харвестеры и форвардеры [3]. В работах А. И. Науменко также установлено, что применение различных видов фиброволокна приводит к существенному увеличению прочности при растяжении, значения которой в ряде случаев значительно превышают нормативные требования [5]. Полученные результаты подтверждают эффективность дисперсного армирования как средства повышения несущей способности и долговечности цементогрунтовых конструкций.

Повышение трещиностойкости. Установлено, что добавление базальтовой фибры приводит к увеличению прочности на растяжение при раскалывании до 18,9 %, что свидетельствует о повышении сопротивляемости материала трещинообразованию [3]. Это позволяет дорожной конструкции более эффективно воспринимать деформации, вызванные сезонными циклами замораживания и оттаивания, а также неравномерными осадками слабого основания, снижая вероятность образования колеи и выбоин. Дополнительное повышение трещиностойкости достигается при модифицировании цементогрунта битумным компонентом СКС-65 ГП, что указывает на перспективность комплексного применения армирующих и модифицирующих добавок [6].

Обеспечение требуемой морозостойкости. В отличие от традиционного цементогрунта, не всегда удовлетворяющего требованиям по морозостойкости, фиброцементогрунт с оптимальным содержанием

базальтового волокна достигает коэффициента морозостойкости 0,81 при нормативном значении не менее 0,8 [3]. Это свидетельствует о повышенной устойчивости материала к циклическому воздействию отрицательных температур, что особенно важно для условий II дорожно-климатической зоны. Аналогичный эффект наблюдается при введении полимерных добавок, в частности «Ренолит», применение которых обеспечивает увеличение коэффициента морозостойкости с 0,56–0,96 до 1,04–1,23 [5], что указывает на значительный потенциал модифицированных цементогрунтов в условиях неблагоприятного климата.

Представленные результаты подтверждают, что дисперсное армирование цементогрунтов волокнистыми материалами является эффективным направлением повышения их эксплуатационных характеристик и может рассматриваться как перспективное решение для ремонта и реконструкции лесных дорог.

Заключение.

Проведенный анализ подтверждает эффективность фиброцементогрунтов при реконструкции лесных дорог в условиях слабых грунтов. Для верхних слоев основания рекомендован фиброцементогрунт М40 с 3,5% базальтовой фибры [3]. Для повышения морозостойкости и трещиностойкости состав следует модифицировать полимерными добавками типа «Ренолит» [5] и битумным компонентом СКС-65 Гп.

Модификация обеспечивает устойчивость конструкции к нагрузкам и климатическим воздействиям, увеличивая межремонтные сроки и снижая эксплуатационные затраты по сравнению с традиционными материалами. Применение базальтовых волокон, в том числе промышленных отходов, повышает ресурсоэффективность технологии.

Следовательно, использование фиброцементогрунтов является обоснованным методом повышения долговечности лесных дорог. Перспективы развития направления связаны с оптимизацией составов для конкретных условий эксплуатации.

Библиографический список

1. Силецкий В.В., Ляфшишева М.Р. Особенности расчета жестких дорожных одежд на лесной дороге: сравнение методов расчета и рекомендации // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по

итогах научно-исследовательских работ 2022 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2023. – С. 56-59.

2. *Силецкий В.В., Петрова А.С.* Методика уточнения прочности нежестких дорожных одежд из шламогрунтовых материалов в разных региональных условиях // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2023 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2024. – С. 106-112.

3. *Чудинов С. А.* Фиброцементогрунт в устройстве дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал, 2024. – № 2(398). – С. 118-127.

4. ГОСТ Р 70452-2022. Дороги автомобильные общего пользования. Грунты стабилизированные и укрепленные неорганическими вяжущими. Общие технические условия; введ. 2023-01-01. – Москва: ФГБУ «Институт стандартизации», 2022. – 24 с.

5. *Науменко А.И.* Использование фиброволокна для укрепления дорожных грунтов // Состояние и перспективы развития лесного комплекса в странах СНГ. – Минск: БГТУ, 2018. – С. 20-24.

6. *Голубева Е.А., Фомин М.В.* Повышение качества дорожного цементогрунта модифицированием полимером "Ренолит" // Совершенствование технологий строительства и ремонта дорог для условий Сибири: сборник трудов. – Омск: Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, 2010. – С. 95-99.

7. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия; введ. 2022-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 25 с.

Сведения об авторах

ФИО	Бодров Александр Викторович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	bodrovaleksandr2004@gmail.com

ФИО	Силецкий Вадим Витальевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	4495-0838
e-mail	lol.spairo@yandex.ru

Аннотация

Обобщены результаты исследований по применению фиброцементогрунтов для реконструкции лесных дорог в сложных грунтово-климатических условиях. Выполненный анализ научно-технических и нормативных источников показал, что дисперсное армирование полимерными волокнами повышает физико-механические характеристик материала, а комплексная модификация составов увеличивает трещиностойкость дорожных одежд.

Ключевые слова: лесные автомобильные дороги, реконструкция лесных дорог, слабые грунты основания, цементогрунт, фиброцементогрунт.

УДК 630*381.2

Раздел рубрикатора ГРНТИ 66.17.15

ВЛИЯНИЕ НАНОДИОКСИДА КРЕМНИЯ НА МОРОЗНОЕ ПУЧЕНИЕ ГРУНТОВ В ОСНОВАНИЯХ ЛЕСНЫХ ДОРОГ

Василюк К. Д., Бодров А. В.

Введение.

Автомобильные дороги являются важнейшим элементом транспортной инфраструктуры, во многом определяющим эффективность экономической деятельности. При проектировании дорожных одежд общего пользования основными расчетными параметрами выступают интенсивность движения и осевая нагрузка транспортных средств. Лесные дороги занимают в этом ряду особое положение. Для них характерна сравнительно невысокая интенсивность движения, однако осевые нагрузки

лесовозных автопоездов зачастую существенно превышают допустимые значения для дорог общего пользования, что создает повышенные требования к несущей способности дорожной конструкции [1].

Традиционным решением при строительстве лесных дорог является применение грунтов, укрепленных цементом (цементогрунтов). Такие материалы обеспечивают необходимую прочность и относительно невысокую стоимость. Однако, как показывает практика эксплуатации, цементогрунты подвержены деструктивным процессам при циклическом замерзании и оттаивании. Миграция влаги к фронту промерзания и последующее образование ледяных линз приводят к морозному пучению грунтов основания. Это, в свою очередь, вызывает неравномерные деформации и преждевременное разрушение дорожного покрытия, существенно сокращая межремонтные сроки [2,3].

Одним из перспективных направлений повышения долговечности цементогрунтов является модификация их структуры нанодиоксидом кремния (SiO_2). Ранее было показано, что введение наночастиц SiO_2 в цементные системы способствует уплотнению цементной матрицы, снижению ее проницаемости и участвует в пуццолановых реакциях на поздних стадиях твердения, что положительно сказывается на прочностных характеристиках материала [4,5]. В частности, в работе [4] отмечено увеличение прочности цементобетона до 10% при модификации нанокремнеземом. Однако влияние нанодиоксида кремния на процессы миграции влаги и морозного пучения именно в сезонно-мерзлых грунтах оснований лесных дорог изучено недостаточно. Существующие исследования [6] касаются преимущественно модификации полимерными добавками либо рассматривают общие вопросы расчета дорожных одежд [1, 2], оставляя открытым вопрос о применении наноразмерных модификаторов для повышения морозостойкости цементогрунтов в специфических условиях лесных дорог.

Цель работы – анализ эффективности применения нанодиоксида кремния для снижения морозного пучения грунтов, укрепленных цементом, в основаниях лесных автомобильных дорог.

Методы исследования.

Выполнен аналитический обзор научных статей и нормативной документации по ключевым словам: лесные дороги, цементогрунт, морозное пучение, нанодиоксид кремния.

Анализ проведен в три этапа:

- обзор способов укрепления грунтов лесных дорог;

- анализ механизмов влияния нано-SiO₂ на свойства цементных систем [4,5];
- оценка перспектив применения нано-SiO₂ для снижения морозного пучения.

Эффективность оценивалась по критериям ГОСТ Р 70452-2022 [3]: прочность при сжатии, морозостойкость, коэффициент фильтрации.

Результаты исследования.

В работе [4] установлено, что введение нанодиоксида кремния (25% от массы сухого цемента) в цементные системы повышает прочность образцов до 10% на всех стадиях твердения. Эффект объясняется участием наночастиц в пуццолановых реакциях, активизирующихся на поздних сроках гидратации, что подтверждается данными о влиянии нанокремнезема на морфологию продуктов гидратации [5].

Снижение проницаемости цементогрунта, отмеченное в [4], непосредственно влияет на миграцию влаги. Согласно ГОСТ Р 70452-2022 [3], коэффициент фильтрации является одним из критериев пригодности укрепленных грунтов для регионов с сезонным промерзанием. Чем ниже фильтрация, тем меньше влаги поступает к фронту промерзания, что снижает интенсивность морозного пучения.

В отличие от полимерных модификаторов (например, «Ренолит» [6]), действие которых основано на гидрофобизации, нанодиоксид кремния встраивается в структуру цементного камня, повышая его плотность и прочность. Однако, как отмечено в [1, 2], выбор метода укрепления должен учитывать региональные условия и специфику лесных дорог. В работе [7] также подчеркивается важность фракционного состава материалов при проектировании дорожных конструкций для лесного комплекса.

Таким образом, применение нанодиоксида кремния снижает фильтрационную способность цементогрунтов и повышает их прочность, что позволяет рассматривать этот метод как перспективный для уменьшения морозного пучения в основаниях лесных дорог.

Вывод.

Проведенный анализ показал, что модификация цементогрунтов нанодиоксидом кремния повышает прочность материала до 10% за счет уплотнения структуры и активизации пуццолановых реакций [4,5]. Снижение коэффициента фильтрации, регламентируемого ГОСТ Р 70452-2022 [3], ограничивает миграцию влаги к фронту промерзания, что уменьшает интенсивность морозного пучения грунтов оснований лесных дорог. В отличие от полимерных модификаторов, наночастицы SiO₂ встраиваются в цементную матрицу, обеспечивая комплексный эффект:

рост прочности и снижение водопроницаемости. Полученные результаты позволяют рассматривать нанодиоксид кремния как перспективную добавку для повышения долговечности оснований лесных дорог в условиях циклического замерзания и оттаивания. Для проверки сделанных выводов запланированы лабораторные испытания образцов цемогрунта, модифицированного нанодиоксидом кремния.

Библиографический список

1. *Силецкий В.В., Ляфшишева М.Р.* Особенности расчета жестких дорожных одежд на лесной дороге: сравнение методов расчета и Рекомендации // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2022 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2023. – С. 56-59.

2. *Силецкий В.В., Петрова А.С.* Методика уточнения прочности нежестких дорожных одежд из шламогрунтовых материалов в разных региональных условиях // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2023 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2024. – С. 106-112.

3. ГОСТ Р 70452-2022. Дороги автомобильные общего пользования. Грунты стабилизированные и укрепленные неорганическими вяжущими. Общие технические условия; введ. 2023-01-01. – Москва: ФГБУ «Институт стандартизации», 2022. – 24 с.

4. *Флорес-Вивиан И., Прадото Р., Кожухова М., Потанов В., Соболев К.* Влияние наночастиц SiO₂ на характеристики цементных материалов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, 2018. – Т. 3. – № 6. – С. 6-16.

5. *Hu K., Chen X., Chen J., Ren X.* Laboratory Investigation of the Effect of Nano-Silica on Unconfined Compressive Strength and Frost Heaving Characteristics of Silty Clay // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2018. – Vol. 55. – Issue 5. – P. 352-357.

6. *Голубева Е.А., Фомин М.В.* Повышение качества дорожного цемогрунта модифицированием полимером «Ренолит» // Совершенствование технологий строительства и ремонта дорог для условий Сибири: сборник трудов. – Омск: Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, 2010. – С. 95-99.

7. *Силецкий В.В.* Оценка влияния химического и фракционного состава нефелинового шлама на прочностные свойства шламогрунтов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2023. – № 243. – С. 227-239.

Сведения об авторах

ФИО Василюк Кирилл Данилович
Организация Санкт-Петербургский государственный
лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации 194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург,
Россия
SPIN-код -
e-mail kirik121314@gmail.com

ФИО Бодров Александр Викторович
Организация Санкт-Петербургский государственный
лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации 194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург,
Россия
SPIN-код -
e-mail bodrovaleksandr2004@gmail.com

Аннотация

Рассмотрено влияние нанодиоксида кремния на свойства цементогрунтов, используемых в основаниях лесных автомобильных дорог. Выполнен анализ литературных данных о механизмах взаимодействия наночастиц SiO_2 с цементной матрицей. Показано, что введение нанодиоксида кремния снижает коэффициент фильтрации укрепленного грунта и повышает его прочность, что ограничивает миграцию влаги и уменьшает интенсивность морозного пучения в условиях сезонного промерзания. Сделаны выводы о перспективности применения наномодификатора для повышения долговечности дорожных конструкций.

Запланированы лабораторные испытания для экспериментальной проверки полученных выводов.

Ключевые слова: лесные дороги, цементогрунт, нанодиоксид кремния, морозное пучение, миграция влаги, сезонно-мерзлые грунты

УДК 630*381.2

Раздел рубрикатора ГРНТИ 66.17.15

ОЧИСТКА ЛЕСОСЕК В СИСТЕМЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Галактионов О.Н., Шадрин Р.А.

Введение.

Согласно статье 23.2. «Лесосечные работы» Лесного кодекса Российской Федерации (от 04.12.2006 № 200-ФЗ) лесосечные работы состоят из подготовительных, основных и заключительных работ, связанных с рубками лесных насаждений при осуществлении различных видов использования лесов в соответствии с главой 2 Лесного кодекса, а также при проведении мероприятий по сохранению лесов.

Также согласно статье 23.2. Лесного кодекса заключительные лесосечные работы представляют собой очистку лесосек и снос объектов лесной инфраструктуры.

Тем не менее, в современных нормативно-методических документах существуют некоторые разночтения в части требований к очистке лесосек.

Кроме того, специалисты лесного хозяйства и лесной промышленности придерживаются разных взглядов на проблему очистки лесосек, на технологии её проведения, но бесспорно одно – очистка лесосек представляет собой важный технологический процесс в системе технологий лесозаготовительного производства.

Цель исследования – обоснование важности очистки лесосек как неотъемлемой части технологий лесозаготовительного производства, а также заострить внимание на технологических аспектах её проведения.

Для достижения цели настоящего исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать современную нормативно-методическую основу очистки лесосек, а также учебную и научную литературу по данной теме исследований;

2. Выявить в современных нормативно-методических документах, а также в учебной и научной литературе по данной теме исследований разночтения в части требований к очистке лесосек;

3. Обозначить технологические особенности проведения мероприятий по очистке лесосек применительно к условиям лесозаготовительных предприятий Северо-Запада Российской Федерации;

4. Определить направление дальнейших научных исследований в области очистки лесосек как неотъемлемой части технологий лесозаготовительного производства.

Методы исследования.

Методической основой изучения взаимодействия компонентов лесного биогеоценоза служат «Основы лесной биогеоценологии» Владимира Николаевича Сукачева, а также математическая статистика.

Взаимодействие компонентов леса очень разнообразно и сложно. И так как все взаимодействия компонентов между собой связаны и взаимообусловлены, то, чем полнее и глубже они выяснены, тем более уверенно будет лесное хозяйство ими управлять, к чему в значительной степени и сводятся лесохозяйственные мероприятия в лесу [1].

Биогеоценология – своеобразный научный подход к изучению природы, при котором основное внимание уделяется функциональным системным связям и особенностям. Подход, безусловно, прогрессивный [2].

Основываясь на лесной биогеоценологии как на научном подходе к изучению природы, легче понять суть и необходимость проектирования и проведения мероприятий по очистке лесосек, их технологические аспекты как неотъемлемой части технологий лесозаготовительного производства.

Кроме того, исследованиями в области очистки лесосек занимались многие видные специалисты: М.Е. Ткаченко, Н.Е. Декатов, И.С. Мелехов, А.В. Побединский, Г.К. Виногоров, М.В. Никонов, С.Н. Сеннов и др.

Результаты исследования.

С точки зрения специалистов лесного хозяйства существует следующий взгляд на очистку лесосек.

После рубки на лесосеке остается в среднем 15-20% биомассы срубленных деревьев: ветви, вершины, щепы, фаутные отрезки ствола, опилки.

По мнению М.В. Никонова, очистка лесосек – обязательная часть лесозаготовительного процесса. С лесоводственной точки зрения эта мера важна для достижения трех целей:

- уменьшения пожарной опасности;
- улучшения санитарного состояния леса;

- создания благоприятных условий для естественного и искусственного возобновления.

При определенных экономических условиях очистка лесосек необходима для концентрации порубочных остатков с целью их переработки: ветвей и листвы на корм скоту, а сучьев и вершин в щепу, арболит [3].

С позиций специалистов лесной промышленности существует следующее мнение относительно очистки лесосек.

Как отмечал в своей фундаментальной работе в области очистки лесосек Г.К. Виногоров, очистка лесосек – одна из самых трудоемких операций в лесозаготовительном процессе. Трудовые и денежные затраты на неё исключительно велики. Непосредственно при проведении лесосечных работ на долю очистки (сбор и переноску сучьев) приходится 15-18% рабочего времени малых комплексных бригад. На весеннюю доочистку каждого гектара затрачивается в среднем 3,9 чел.-дня. Для лесозаготовок очистка лесосек не нужна, в производственном процессе она является совершенно излишней, более того, она требует усложнения технологии, отрицательно влияет на смежные операции. В результате постоянного повторения (в учебниках, инструкциях, и т.д.) взгляды на очистку лесосек стали настолько привычными, что обычно не возникает даже сомнений в достоверности и всесторонней изученности этого вопроса. Однако при детальном подходе к этой проблеме выясняется, что лесохозяйственная наука не имеет серьезных доказательств необходимости очистки лесосек [4].

Таким образом, мы видим, что существуют два диаметрально противоположных взгляда на очистку лесосек со стороны лесного хозяйства и со стороны лесной промышленности.

Теперь обратимся к нормативно-методическим документам в той последовательности, в которой специалисты лесного хозяйства обосновывают необходимость очистки лесосек.

1. Уменьшение пожарной опасности.

Анализ современной нормативно-методической основы очистки лесосек необходимо начать с Постановления Правительства РФ от 07.10.2020 № 1614 «Об утверждении Правил пожарной безопасности в лесах».

Требования пожарной безопасности в лесах при проведении рубок лесных насаждений, определённые этим документом, включают:

26. При проведении рубок лесных насаждений одновременно с заготовкой древесины следует производить очистку мест рубок (лесосек) от порубочных остатков.

В случаях, когда граждане и юридические лица, осуществляющие использование лесов, обязаны сохранить подрост и молодняк, огневые способы очистки мест рубок (лесосек) от порубочных остатков запрещаются.

27. При проведении очистки мест рубок (лесосек) осуществляются:

а) весенняя доочистка в случае рубки в зимнее время;

б) укладка порубочных остатков длиной не более 2 метров в кучи или валы шириной не более 3 метров с уплотнением их к земле для перегнивания, сжигания или разбрасывания в измельченном виде по площади места рубки (лесосеки) на расстоянии не менее 10 метров от прилегающих лесных насаждений. Расстояние между валами должно быть не менее 20 метров, если оно не обусловлено технологией лесосечных работ;

в) завершение сжигания порубочных остатков при огневом способе очистки мест рубок (лесосек) до начала пожароопасного сезона. Сжигание порубочных остатков от летней заготовки древесины и порубочных остатков, собранных при весенней доочистке мест рубок (лесосек), производится осенью, после окончания пожароопасного сезона.

28. В отдельных районах в виде исключения сжигание порубочных остатков допускается в период пожароопасного сезона (при установлении первого класса пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды) по решению органов государственной власти или органов местного самоуправления, указанных в пункте 4 настоящих Правил.

При сжигании порубочных остатков должны обеспечиваться сохранность имеющихся на местах рубок (лесосеках) подроста, деревьев-семенников и других несрубленных деревьев, а также полное сгорание порубочных остатков.

Сжигание порубочных остатков сплошным палом запрещается.

2. Улучшение санитарного состояния леса.

Согласно Постановлению Правительства РФ от 09.12.2020 № 2047 «Об утверждении Правил санитарной безопасности в лесах»:

20. В лесах не допускается:

в) невыполнение или несвоевременное выполнение работ по очистке лесосек...;

21. Для предотвращения усыхания деревьев по опушкам вырубок не допускается проведение чересполосных рубок в еловых и пихтовых лесных насаждениях.

При разработке лесосек, строительстве и реконструкции линейных объектов запрещается сдвигание порубочных остатков к краю леса (стене леса). При проведении рубок в очагах вредных организмов порубочные остатки подлежат сжиганию, измельчению, обработке пестицидами или вывозу в места, предназначенные для переработки древесины.

34. Порубочные остатки после выборочных и сплошных санитарных рубок в очагах вредных организмов подлежат сжиганию, измельчению, обработке пестицидами или вывозу в места, предназначенные для переработки древесины.

35. При проведении рубок лесных насаждений осуществляется очистка мест рубок от порубочных остатков в соответствии с утвержденным порядком проведения лесосечных работ.

3. Создание благоприятных условий для естественного и искусственного возобновления.

Согласно Приказу Минприроды России от 29.12.2021 № 1024 «Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления»:

18. Меры по сохранению подроста и молодняка лесных насаждений основных лесных древесных пород осуществляются одновременно с проведением рубок лесных насаждений. Рубка в таких случаях проводится преимущественно в зимнее время по снежному покрову с применением технологий, позволяющих обеспечить сохранение от уничтожения и повреждения подроста и молодняка основных лесных древесных пород в количестве, указанном в приложениях 1-41 к Правилам.

После проведения рубок проводится обследование и уход за сохраненным подростом и молодняком лесных древесных пород путем освобождения от завалов порубочными остатками, вырубки сломанных и поврежденных экземпляров. В случае, если при обследовании количество жизнеспособного подроста и молодняка основных лесных древесных пород оказывается недостаточным, лица, ответственные за лесовосстановление, вносят изменения в проект лесовосстановления и проводят искусственное или комбинированное лесовосстановление в течение двух лет с момента осмотра мест рубок.

Таким образом, аргументы специалистов лесного хозяйства, обосновывающие необходимость очистки лесосек, нашли своё подтверждение в действующих нормативно-методических документах. Очистку лесосек согласно действующему законодательству Российской Федерации необходимо осуществлять, причём определёнными способами, о которых скажем далее.

Приказ Минприроды России от 17.01.2022 № 23 «Об утверждении видов лесосечных работ, порядка и последовательности их выполнения, формы технологической карты лесосечных работ, формы акта заключительного осмотра лесосеки и порядка заключительного осмотра лесосеки» содержит целый ряд требований, которые определяют технологические особенности очистки лесосек как неотъемлемой части технологий лесозаготовительного производства.

Очистка мест рубок от порубочных остатков осуществляется следующими способами:

- укладкой порубочных остатков на волок с целью их укрепления и предохранения почвы от сильного уплотнения и повреждения при трелевке;
- сбором порубочных остатков в кучи и валы с последующим сжиганием их в пожаробезопасный период;
- сбором порубочных остатков в кучи и валы с оставлением их на месте для перегнивания и для подкормки диких животных в зимний период;
- разбрасыванием измельченных порубочных остатков в целях улучшения лесорастительных условий;
- укладкой и оставлением на перегнивание порубочных остатков на месте рубки;
- вывозом порубочных остатков в места их дальнейшей переработки.

Указанные способы очистки мест рубок при необходимости могут применяться комбинированно.

После проведения указанных работ допускается доочистка лесосек.

Очистка лесосек сплошных рубок с последующим искусственным лесовосстановлением должна производиться способами, обеспечивающими создание условий для проведения всего комплекса лесовосстановительных работ (подготовка участка и обработка почвы, посадка или посев лесных культур, агротехнические уходы), а также ухода за молодняками.

Очистка лесосек сплошных рубок с наличием подроста ценных пород должна осуществляться способами, обеспечивающими его сохранность.

Сжигание порубочных остатков сплошным палом не допускается.

Анализируя технологические карты лесосечных работ лесозаготовительных предприятий Северо-Запада Российской Федерации,

авторы пришли к выводу, что наиболее распространёнными способами очистки лесосек служат:

- укладка порубочных остатков на волокни с целью их укрепления и предохранения почвы от сильного уплотнения и повреждения при трелевке;
- сбором порубочных остатков в кучи и валы с оставлением их на месте для перегнивания и для подкормки диких животных в зимний период.

Говоря о разночтениях в части требований к очистке лесосек в разных нормативно-методических документах, необходимо сказать, что, например, в Правилах пожарной безопасности в лесах приводятся определённые требования к порубочным остаткам, кучам и валам, тогда как в вышеприведённом Приказе Минприроды России от 17.01.2022 № 23 таких требований нет:

укладка порубочных остатков длиной не более 2 метров в кучи или валы шириной не более 3 метров с уплотнением их к земле для перегнивания, сжигания или разбрасывания в измельченном виде по площади места рубки (лесосеки) на расстоянии не менее 10 метров от прилегающих лесных насаждений. Расстояние между валами должно быть не менее 20 метров, если оно не обусловлено технологией лесосечных работ.

Приказ Минтруда России от 23.09.2020 № 644н «Об утверждении Правил по охране труда в лесозаготовительном, деревообрабатывающем производствах и при выполнении лесохозяйственных работ» содержит Требования охраны труда при машинной очистке деревьев от сучьев и очистке лесосек, которые добавляют условия, которых опять-таки нет в Приказе Минприроды России от 17.01.2022 № 23:

116. При механизированной очистке лесосек порубочные остатки диаметром более 8 см должны быть раскряжеваны на отрезки длиной не более 3 м.

117. Запрещается работникам находиться ближе 5 м по отношению друг к другу при ручной очистке лесосеки.

120. Уборка сучьев от сучкорезных установок должна быть механизирована.

Таким образом, действующие нормативно-методические документы содержат целый ряд требований к технологиям лесозаготовительного производства, в том числе, и к очистке лесосек. Однако эти требования не сконцентрированы в одном нормативно-методическом документе, а рассредоточены по разным документам, зачастую, лесохозяйственным. По мнению авторов, это не в последнюю очередь определяет различие во взглядах на очистку лесосек специалистов лесного хозяйства и лесной промышленности.

Это обстоятельство необходимо учитывать при определении направлений дальнейших научных исследований в области технологий лесозаготовительного производства.

Заключение.

Если есть мероприятие – значит, у него должна быть и технология проведения, и очистка лесосек – не исключение. Как было указано выше, одним из наиболее распространённых способов очистки лесосек служит укладка порубочных остатков на волок с целью их укрепления и предохранения почвы от сильного уплотнения и повреждения при трелевке. При проведении лесосечных работ оператор валочно-сучкорезно-раскряжевой машины захватывает харвестерной головкой порубочные остатки и укладывает их на волок под колёса машины. Однако это отрицательным образом сказывается на калибровке харвестерной головки.

В связи с этим, одним из направлений дальнейших научных исследований в области технологий лесозаготовительного производства и применяемых систем машин, по мнению авторов, будет доработка валочно-сучкорезно-раскряжевой машины для очистки лесосек попутно с заготовкой древесины, что поможет экономить время и деньги на очистку лесосек.

Кроме того, в настоящее время все большие перспективы развития имеет альтернативная энергетика с использованием местных возобновляемых источников тепловой энергии, среди которых значительное место занимают отходы лесозаготовок (сучья, вершинки, фаутная древесина) [5].

Библиографический список

1. Сукачев В. Н. Основы лесной биогеоценологии. – М.: Наука, 1964. – 570 с.
2. Сеннов С.Н. Лесоведение и лесоводство: учебник; 3-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: Издательство «Лань», 2022. – 336 с.
3. Никонов М.В. Лесоводство: учебное пособие. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 224 с.
4. Пятакин В.И. [и др.]. Технология и машины лесосечных работ: учебник; под ред. В.И. Пятакина. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2012. – 362 с.
5. Шегельман И.Р., Скрыпник В.И., Питухин А.В., Галактионов О.Н. Производство лесосечных работ. Технология и техника: учебное пособие

для студентов вузов лесоинженерного профиля. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2015. – 368 с.

Сведения об авторах

ФИО	Галактионов Олег Николаевич
Организация	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петрозаводский государственный университет»
Адрес организации	185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, просп. Ленина, д. 33
SPIN-код	3419-8438
e-mail	galakt@petrsu.ru
ФИО	Шадрин Роман Александрович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	1768-1512
e-mail	shadrin-ra1976@yandex.ru

Аннотация

В настоящей статье поднят вопрос о том, что в современных условиях существует два диаметрально противоположных мнения на очистку лесосек: специалистов лесного хозяйства и специалистов лесной промышленности. В действующих нормативно-методических документах, регулирующих, в том числе, лесозаготовительное производство, существуют разночтения, касающиеся требований к очистке лесосек. Вышеперечисленные обстоятельства должны быть положены в основу дальнейших научных исследований по данной проблеме.

Ключевые слова: технология, лесозаготовительное производство, очистка лесосек, порубочные остатки, технологические аспекты.

УДК 630.320.06

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.15.01

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК В ЛЕСНОЙ ОТРАСЛИ

Зубова О.В., Куделевич К.В.

Введение.

Лесная отрасль России обладает одной из самых сложных логистик в мире. Места лесозаготовок часто находятся в труднодоступной местности, вдали от магистральных дорог и крупных портов. При этом доставка круглого леса, пиломатериалов или щепы требует не только высокой надежности, но и экономической эффективности на каждом участке пути. Именно поэтому мультимодальные перевозки, сочетающие разные виды транспорта, являются не просто удобным вариантом, а безальтернативной основой для работы лесопромышленного комплекса (ЛПК). Они позволяют бесшовно соединить удаленные лесосеки с глобальными рынками сбыта.

Цель работы – обзор перспективы развития мультимодальных перевозок в лесной отрасли.

Методы исследования.

Обзор данных по мультимодальным перевозкам с акцентом на применимость в лесопромышленном комплексе.

Результаты исследования.

Мультимодальными перевозками принято называть перевозку груза, в процессе которой задействуются два и более вида транспорта. При этом транспортировка осуществляется по одному договору, исполнитель несет ответственность за товар на протяжении всего пути из начального пункта в конечный несмотря на то, что в этом процессе зачастую участвуют и другие компании (суб-перевозчики). Перевозчик является МТО - мультимодальным транспортным оператором.

Принято считать, что первый мультимодальный контейнерный маршрут в практике международных грузоперевозок появился в Канаде и США в 1955 году. Называться первым он стал потому, что принявшие участие в транспортной цепочке грузовые автомобили, железная дорога и морские суда были переоборудованы под прообраз современного контейнера, а для заказчиков роль грузоперевозчика выполняла специально созданная конгломератом компания. Но еще долгие годы разность стандартов не позволяла организовать международные сообщения, которые бы существенно ускорили процессы мультимодальных грузоперевозок, в частности операций погрузки-выгрузки. Только в США до 1965 года существовало больше десятка разнотипных по конструкции и

грузоподъемности контейнеров, отличавшихся еще и способом крепления их на ж/д платформе или на палубе судна, что тормозило развитие мультимодальных грузоперевозок [1].

Перевозка груза в контейнерах в Советском Союзе также не отличалась системностью. В послевоенные годы существовало несколько прообразов современного контейнера: цельнометаллические контейнеры НР-2,5-00-1, которые позже сменили на 5-ти тонные НР-5-1, а с появлением международного стандарта ISO [2], на отечественный рынок грузоперевозок был выпущен тип УУК-5-2 с торцевым типом дверей. Соответственно, отсутствие единого стандарта заставляло многих грузоотправителей подбирать подрядчиков на каждый этап доставки.

Во времена войны во Вьетнаме военные снабженцы оценили все преимущества стандартизации контейнеров, которая упрощалась процесс мультимодальных перевозок в целом, т.к. за доставку продовольствия, боеприпасов, обмундирования и военной техники, габариты которой были далеко не стандартными, равно как и вес, вместо отдельных компаний бралась только одна, координировавшая работу многих видов транспорта.

Именно мультимодальные перевозки военной техники и контейнеров оказали колоссальное влияние на торговый флот, инфраструктуру портов, автомобильные и железнодорожные перевозки. Более того, они оказали влияние и на всю мировую торговлю, дав возможность развитию целой логистической отрасли.

Виды транспорта, задействованные в мультимодальных перевозках [3]:

- Морской транспорт зарекомендовал себя с лучшей стороны при необходимости поставок крупных и небольших товарных партий. Существуют специализированные суда, среди которых можно выделить контейнеровозы, балкеры, танкеры, на которые всегда есть высокий спрос. Основными преимуществами считается возможность отправки тысяч тонн продукции одним рейсом и низкие тарифы. Недостатком является значительная продолжительность рейсов, возможность задержек, сезонные факторы.
- Железнодорожный транспорт. Большая протяженность страны предопределила популярность ж/д транспорта. Разнообразие вагонов позволяет доставлять продукцию разного назначения, включая опасные грузы. Клиентов привлекают низкие тарифы, возможность отправки самых разных товаров, сырья, материалов. Из недостатков стоит отметить слабую разветвленность ж/д путей в некоторых регионах, необходимость осуществления сложных стыковок с другим транспортом.

- Автомобильный транспорт. Без грузовых машин редко обходятся сложные логистические схемы. В конечном счете, машины поставляют заказчикам товары из портов после прибытия судов, с ж/д станций после завершения выгрузки. Именно автомобилем можно доставить грузы в отдаленные горные районы, северные регионы. Есть и определенные сложности, которые заключаются в возможности перекрытия магистралей из-за значительного ухудшения погодных условий. Такие риски обычно следует принимать в расчет зимой.
- Авиаперевозки. Авиация нечасто используется в построении стабильных логистических схем. Только специфические товары, представляющие особую ценность, перевозятся самолетами, вертолетами на постоянной основе. К примеру, это могут быть морские деликатесы, медикаменты, драгоценности, произведения искусства. Бывают грузы, требующие максимально быстрой поставки. Среди этой категории могут быть механизмы, оборудование, документы, токсичные, опасные вещества и материалы.

Процесс мультимодальных перевозок состоит из нескольких частей, основными из них считаются:

- 1) Планирование. Маршрут составляется, исходя из характеристик груза, географического положения начального и конечного пунктов, климатических условий, расположение пунктов перевалки, срочности сроков доставки.
- 2) Подготовка и упаковка. Контроль и грамотный выбор тары для перевозки груза, контроль упаковывания и укрупнения грузовых в начальной точке маршрута (от отправителя).
- 3) Перевозка. Необходимость постоянного контроля проведения ППР при перегрузке с одного ТС на другое, контроль своевременной подачи ТС, а также соблюдения уставов и ФЗ при перегрузке с одного вида транспорта на другой, передача груза от одного перевозчика к другому (переход ответственности между участниками цепочки). Учёт территориального местоположения и климатических факторов в пунктах перегруза. Способы манипуляций с грузом (при перегрузке).
- 4) Приемка. Конечный этап заключается в таможенной очистке, выгрузке продукции в указанном клиентом месте. После прибытия груза, удостоверившись в надлежащем качестве продукции, заказчик документально оформляет приемку поступившего товара.

Мультимодальные перевозки экономически целесообразны, на каждый участок пути выбирается наиболее эффективный вид транспорта и за счет комбинации видов перевозок можно существенно сократить расходы.

Также они обеспечивают гибкость маршрутов, благодаря возможности преодоления географических преград. Учитывая, что лесозаготовки могут проводиться в районах со слабой инфраструктурой, мультимодальные перевозки позволяют доставить лес из труднодоступной местности. В случае непредвиденных обстоятельств данный метод позволяет быстро перенаправить потоки, снижая риски срыва поставок, повышая управляемость поставками и уменьшая риски задержки груза. Однако данный способ осуществления транспортировки имеет ряд недостатков. За счёт усложненных логистических цепочек мультимодальная перевозка требует больше времени, нежели традиционная, увеличивая время доставки. Учитывая, что груз доставляется разными транспортными средствами, то его сложнее контролировать в течение всего пути следования. Мультимодальная доставка груза требует чёткого взаимодействия всех элементов процесса. Если сотрудники неправильно рассчитали время промежуточных доставок, то могут возникнуть серьёзные проблемы при перемещении груза с одного транспортного средства на другой, что потянет за собой отставание по времени. Высоки риски задержки поставки, срыва сроков поставки, утраты груза при любых манипуляциях.

На данном этапе мультимодальные перевозки имеют перспективы развития и трансформации, в частности в лесной отрасли:

1. Технологическая трансформация, которая подразумевает электронный документооборот, а также унификацию платформ и контроль. За счет исключения из процесса перевозки бумажной волокиты, значительно уменьшится время перевозки на стыках разных видов транспорта. Создание единого контура управления: прокладывание оптимального пути с помощью транспортных платформ с использованием электронных пломб для отслеживания грузов и ускорения обработки транспорта в связке с ИИ, который будет предупреждать о возможных проблемах.

2. Возврат к речной логистике [4]. Суть технологии в том, что металлические контейнеры (6,5×3,5 м) с осадкой 0,5–1 м соединяются в баржевые составы, адаптируемые под глубину реки. Водная транспортировка в контейнерах в 3–5 раз дешевле сухопутной: около 1 руб./км против 5 руб. автотранспортом и 3 руб. ж/д. Для погрузки не нужны спец причалы и краны — достаточно стандартной лесозаготовительной техники (погрузчик или форвардер).

3. «Зеленая» логистика [5]. Низкоэмиссионный транспорт — это общемировой тренд, направленный на уменьшение загрязнения окружающей среды, а также снижение эксплуатационных расходов на топливо и общей стоимости перевозок (особенно в случае водного

транспорта). Уменьшение выбросов позволяет прокладывать маршрут не по кратчайшему расстоянию, а по наиболее быстрому и предсказуемому пути, избегая простоев и перерасхода топлива.

В завершение отметим, что перспективы мультимодальных перевозок в лесной отрасли неразрывно связаны со спецификой самого продукта. На практике это выглядит как сложная, но управляемая цепочка:

1. Первый этап (Вывозка). Лес загружается в лесовоз на делянке. Оформляется электронный документ (ЭСД) в ФГИС ЛК.

2. Второй этап (Перевалка). На промежуточном складе или у причала либо круглый лес грузят на баржу, либо пиломатериалы упаковывают в контейнеры.

3. Третий этап (Магистраль). Далее в дело вступают железная дорога (контейнерные поезда) или речной/морской транспорт, которые и являются основой мультимодальной схемы, обеспечивая экономию на дальнем плече.

4. Четвертый этап (Приемка). В порту или на терминале груз снова перегружается на автомобили для доставки конечному потребителю, при этом вся цепочка отслеживается через единую цифровую платформу.

Заключение.

Использование этих подходов позволяет работникам лесопромышленной отрасли не только снижать логистические издержки и риски, но и осваивать новые рынки сбыта, обеспечивая прозрачность пути леса – от пня до потребителя.

Библиографический список

1. История развития мультимодальных перевозок // Сайт группа компаний Негабаритные перевозки. URL: <https://nperevozki.ru/multimodalnie-perevozki-istoriya-razvitiya> (дата обращения 01.03.2026).

2. Международные стандарты ИСО в области логистики и перевозок // Сайт перевозки в каждый уголок. URL: <https://aljes.ru/normativy/mezhdunarodnye/konventsia-iso/> (дата обращения 10.03.2026).

3. Мультимодальные перевозки грузов // Сайт Грузовичкоф. URL: <https://gruzovichkof.ru/poleznaja-informacija/multimodalnye-perevozki-gruzov> (дата обращения 01.03.2026).

4. В САФУ разработали технологию транспортировки леса по малым рекам // Сайт ТАСС. URL: <https://tass.ru/nauka/24172833> (дата обращения 05.03.2026).

5. Зеленая логистика: что это и почему это важно // Сайт SAP. URL: <https://www.sap.com/central-asia-caucasus/resources/green-logistics> (дата обращения 09.03.2026).

Сведения об авторах

ФИО	Зубова Оксана Викторовна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	6997-4065
e-mail	ok_z19@mail.ru

ФИО	Куделевич Кира Владимировна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	kirakudelevic@gmail.com

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы перспектив развития мультимодальных перевозок в лесной отрасли. Изучена история развития мультимодальных перевозок, выявлены ключевые виды транспорта и этапы перевозки. Представлены способы внедрения мультимодальных перевозок в лесную промышленность.

Ключевые слова: мультимодальные перевозки грузов, транспортирование древесины, логистика.

УДК 630.656

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.17.01

РАСЧЕТ ОБЪЕМА РАБОТ НА ЛЕСНЫХ ТЕРМИНАЛАХ

Козлова И.К., Орлов В.В., Локштанов Б.М.

Введение.

В лесозаготовительной отрасли Северо-Западного региона РФ из-за изменения климата наблюдается увеличение межсезонных периодов (весенней и осенней распутицы) до 1,5–2 месяцев, что затрудняет вывозку круглых лесоматериалов с лесосек. Данная ситуация создает проблему стабильного обеспечения потребителей сортаментами в течение года, что вынуждает лесозаготовителей организовывать специализированные перегрузочные терминалы на лесосеке для создания запасов древесины. В работе выполнен расчет объемов складирования на одно- и двухфункциональных терминалах, определены рациональные параметры штабелей с учетом породного состава и качества древесины. Результаты позволяют адаптировать технологию складирования к изменяющимся климатическим условиям и обеспечить стабильную отгрузку сортиментов потребителям на расстояние до 250 км.

Цель работы – установить размер межсезонного периода и обосновать объемы штабелей круглых лесоматериалов, обеспечивающие бесперебойное снабжение потребителей, а также рассмотреть варианты организации терминалов.

Методы исследования.

В статье преимущественно использованы эмпирические методы (аналитические расчеты, сравнение, классификация) с элементами нормативного и системного подходов. Работа носит прикладной характер и направлена на решение практической задачи — обоснование параметров лесосечных терминалов в изменившихся климатических условиях.

Результаты исследования.

Терминалы – перегрузочные пункты – организуют возле магистралей [1,2]. Наиболее простым видом терминала является однофункциональный терминал, на котором производят простейшие работы: складирование сортиментов, доставляемые с делянки или лесовозами типа Урал-4320, или форвардерами в соответствующие штабеля. Разбор штабелей и сортиментов производят на большегрузные лесовозы с манипулятором и прицепом, позволяющие перевозить 30-40 пл.м³ за рейс на расстояние до 250 км. Отметим, что лесовоз Урал-4320 может перевозить до 16–18 пл.м³ сортиментов на расстояние 50-100 км с соответствующим большим расходом топлива.

Отметим, что формирование и разбор штабелей сортиментов могут производить перечисленные выше агрегаты с манипуляторами, а также специализированные перегрузчики для бревен. Применение перегрузчика зависит от объема перегрузочных работ, размеров и расположения штабелей и площадей их обслуживания.

Рассмотрим работы, производимые на однофункциональном терминале лесозаготовительного предприятия при заготовке $Q=300\ 000$ пл.м³ сортиментов в год. Предприятие расположено в Северо-Западном округе РФ, в лесорастительной зоне с формулой лесов 4С3Е2Б1Ос.

Для расчета объема работ на терминале примем условие, что с терминала сортименты доставляют потребителям равномерно в течение года, а межсезонные периоды (осенью и весной, когда лесозаготовки не производят) компенсируют древесиной, складываемой на терминале в период интенсивной лесозаготовки зимой и летом.

Величина межсезонного периода зависит от климата региона и состояния лесных дорог. Если в прошлые годы межсезонный период принимали за один месяц осенью (с 15 октября по 15 ноября) и один месяц весной (с 15 апреля по 15 мая) и этого было достаточно, то сначала 21 века происходит увеличение этих периодов в 1,5–2,0 раза, а по времени смещение к зиме на 1.5-2.0 недели, и к лету – на полторы недели. Такие изменения [3] обязывают предусмотреть запасы сортиментов на межсезонный период, уже не на один месяц, а на 1,5-2,0 месяца. Принимаем для расчета запас на 2 месяца, тем более, что именно создание терминала на лесосеке позволяет создавать такие запасы и организовывать равномерную подачу сортиментов потребителям.

Весь объем заготавливаемой древесины (сортиментов) разделим на два периода: летний и зимний, т.е. по $Q_1=150\ 000$ пл.м³, тогда объем штабелей на два месяца составит:

$$Q_2 = \frac{Q_1}{n_1} * H_2 = \frac{150000}{6} * 2 = 50000 \text{ пл.м}^3 \quad (1)$$

где Q_2 – объем штабелей на межсезонный период;

Q_1 – объем заготовки сортиментов за полгода года;

n_1 – количество месяцев за полгода, $n_1=6$;

n_2 – количество месяцев на межсезонный период, $n_2=2$.

Полученная величина объемов древесины (сортиментов) в штабеле должна отражать истинные размеры штабеля. Круглые лесоматериалы в штабеле характеризуются коэффициентом полндревесности K_1 и зависят от размера бревен и их качества. Стандарт [4] устанавливает различный коэффициент полндревесности для пиловочника по породе и длине, для

балансов различных пород и длин, и т.д. Сортименты обычно имеют длину 4-6 м. Примем длину сортиментов $l = 6$ м, а коэффициент полнодревесности не сортированных бревен $K_1 = 0.67$. Тогда складочный общий объем штабеля составит:

$$Q_3 = \frac{Q_2}{K} = \frac{50000}{0.67} = 75000 \text{ скл.м}^3 \quad (2)$$

Разберемся с высотой штабеля. Высоту штабеля обеспечивает или автолесовоз своим манипулятором, или форвардер - своим, или перегрузчик – своим.

Автолесовоз и форвардер могут создавать штабель высотой $h=6-7$ м, а перегрузчик уже до $h=10-12$ м. Пока примем высоту штабеля 7 метров. Тогда мы сможем рассчитать общую длину штабеля:

$$L_1 = \frac{Q_3}{l \cdot h} = \frac{75000}{6 \cdot 7} = 1785.7 \text{ м.} \quad [3]$$

Полученная величина длины штабеля около 2 км является неприемлемой, так как придется делать несколько штабелей длиной 75-100 м каждый и высотой 10–12 м. Возникает вопрос о формировании таких штабелей уже с помощью перегрузчика с манипулятором длиной не менее 18 м с грейферным захватом на 3–4 м³. Такой перегрузчик может формировать и разгружать уже по два штабеля справа и слева.

В целях противопожарной безопасности эксплуатации штабелей необходимо между ними делать разрывы по 4–6 м, а летом следует организовать полив штабелей водой из вырытого водоема (бассейна).

С учётом этих требований количество штабелей уже будет около 12. Тогда, благодаря использованию перегрузчика, возможно организовать высокие штабеля с учётом качества сортиментов. Например, сортименты: пиловочник еловый, сосновый, берёзовый (или фанерный кряж); балансы еловые, сосновые, лиственные (берёзовые, осиновые); низкокачественная древесина (НКД).

Распределение складировемой древесины на терминале в зависимости от ее породы и качества указано в табл. 1.

Табл. 1. Распределение складированной древесины на терминале в зависимости от ее породы и качества

Порода	%	Всего	Деловая древесина				НКД	%
		Кол-во пл.м³/скл.м³	Пиловочник	%	Балансы	%		
Сосна	40	$\frac{20000}{29850}$	$\frac{9000}{13432}$	45	$\frac{9000}{13432}$	45	$\frac{2000}{3000}$	10
Ель	30	$\frac{15000}{22388}$	$\frac{6750}{10074}$	45	$\frac{6000}{10000}$	40	$\frac{2250}{3150}$	15
Береза	20	$\frac{10000}{14925}$	$\frac{2000}{3000}$	20	$\frac{4000}{6000}$	40	$\frac{4000}{6000}$	40
Осина	10	$\frac{5000}{7462}$	-	-	$\frac{2000}{3000}$	40	$\frac{3000}{5000}$	60
Итого	100	$\frac{50000}{74625}$	$\frac{17750}{26506}$	-	$\frac{21000}{32432}$	-	$\frac{11250}{17150}$	-

Использование перегрузчика позволяет не только перегружать сортименты, но и сортировать их по назначению и качеству и формировать соответствующие штабеля. По расчетам, если принять размеры штабеля шириной 6 м, высотой 12 м, длины 75 м, то в штабеле будет 5,5–6 тыс. скл. м³ сортиментов. В соответствии с табл. 1 количество штабелей на терминале будет:

Сосна: пиловочник – 2 штабеля; балансы – 2 штабеля; нкд – 1 штабель;

Ель: пиловочник – 2 штабеля; балансы – 2 штабеля; нкд – 1 штабель;

Берёза: пиловочник – 1 штабель; балансы – 1 штабель; нкд – 1 штабель;

Осина: пиловочник – 1 штабель; балансы – 1 штабель; нкд – 1 штабель.

Всего 15 штабелей потребуется организовать на терминале, но с сортированными по породам и назначению сортиментами. Такой подход к складированным сортиментам позволит поднять стоимость отгружаемой продукции.

План организации однофункционального терминала представлен на рис. 1.

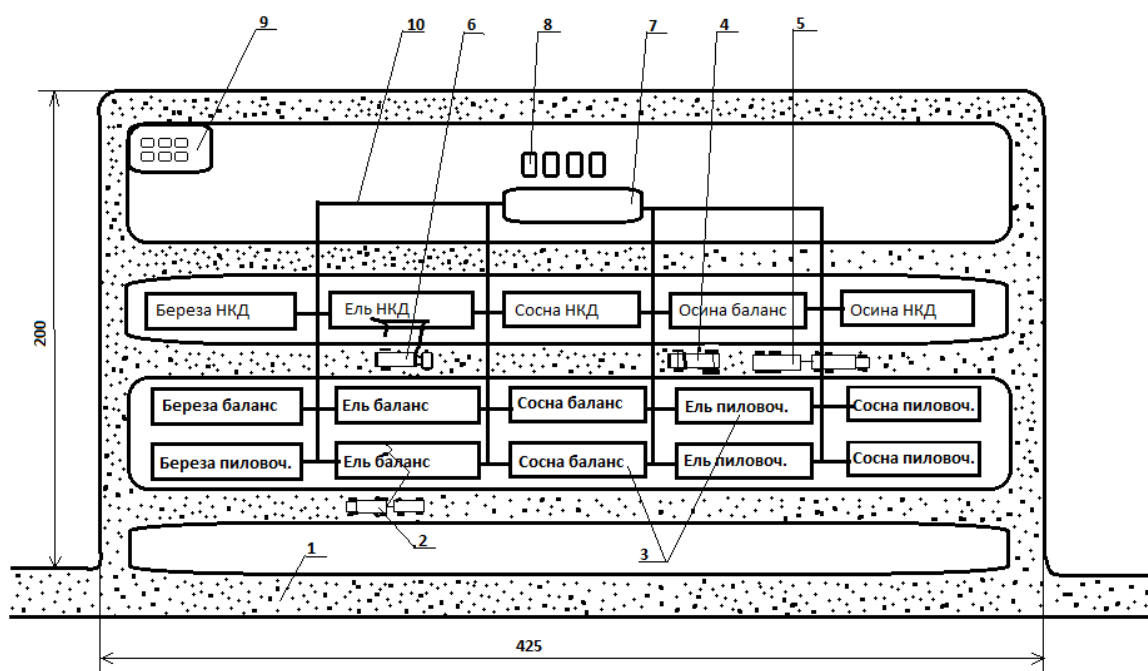


Рис. 1. Схема организации однофункционального терминала с сортированием сортиментов:

1 – магистраль; 2 – большегрузный лесовоз; 3 – штабелы сортиментов; 4 – перегрузчик; 5 – большегрузный лесовоз без манипулятора; 6 – лесовоз Урал; 7 – бассейн; 8 – бытовки; 9 – склад ГСМ; 10 – система полива штабелей

Что касается двухфункционального терминала на лесосеке, то тут кроме функции однофункционального терминала осуществляется ещё и функция по производству топливной щепы из лесосечных отходов и складирование ее в кучу, разбор кучи и загрузка щепы в большегрузные автощеповозы.

Количество лесосечных отходов, доступных к утилизации, составляет 10–15 % от объема заготавливаемой древесины. В нашем случае при заготовке 300 тыс. пл. м³ в год лесосечных отходов будет около 45 тыс. пл.м³. На летний период потребление топливной щепы [5] резко снижается, поэтому на терминале складированию подлежит половина щепы из лесосечных отходов или $Q_4 = 22500$ пл.м³.

При коэффициенте полндревесности щепы $K_2 = 0.38$ (при кучевом хранении высота кучи до 4 метров). Объем хранимой щепы (при квадратной куче в плане) составит:

$$Q_5 = \frac{Q_4}{K_2} = \frac{22500}{0.38} = 60000 \text{ нас. м}^3. \quad (4)$$

При высоте кучи $h_2 = 4$ м площадь квадрата кучи составит:

$$S = \frac{Q_5}{h} = \frac{60000}{4} = 15000 \text{ м}^2. \quad (5)$$

Или сторона квадрата составит 125 м.

В связи с тем, что на двухфункциональном терминале [6] производят топливную щепу из лесосечных отходов, можно решить и вопрос об использовании НКД всех пород для производства топливной щепы. Общее количество НКД за рассматриваемый период складирования составляет 22500 пл.м³ или 59910 нас.м³. Таким образом, количество топливной щепы на терминале уже увеличится почти в два раза, и при этом мы решаем большую проблему утилизации НКД.

Отметим, что известны способы утилизации НКД для производства пилопродукции (тарной доски, пеллет, технологической щепы марки Ц-3, СП, ВП И ГП), но выход такой продукции не превышает 35–40%, а остальное – отходы, которые тоже надо утилизировать.

Размеры кучи топливной щепы в этом случае достигают объема 120 тыс. нас.м³. При высоте кучи $h_2 = 4$ м площадь квадрата кучи составит 30000 м², тогда сторона квадрата будет равна примерно 175 метров.

Для производства указанного количества топливной щепы 120 тыс. нас.м³ из НКД за полгода необходимо предусмотреть 2 мобильных рубительные машины производительностью 80-100 нас.м³ в час и имеющие загрузочный патрон не менее 60 см.

Схема двухфункционального терминала представлена на рис. 2.

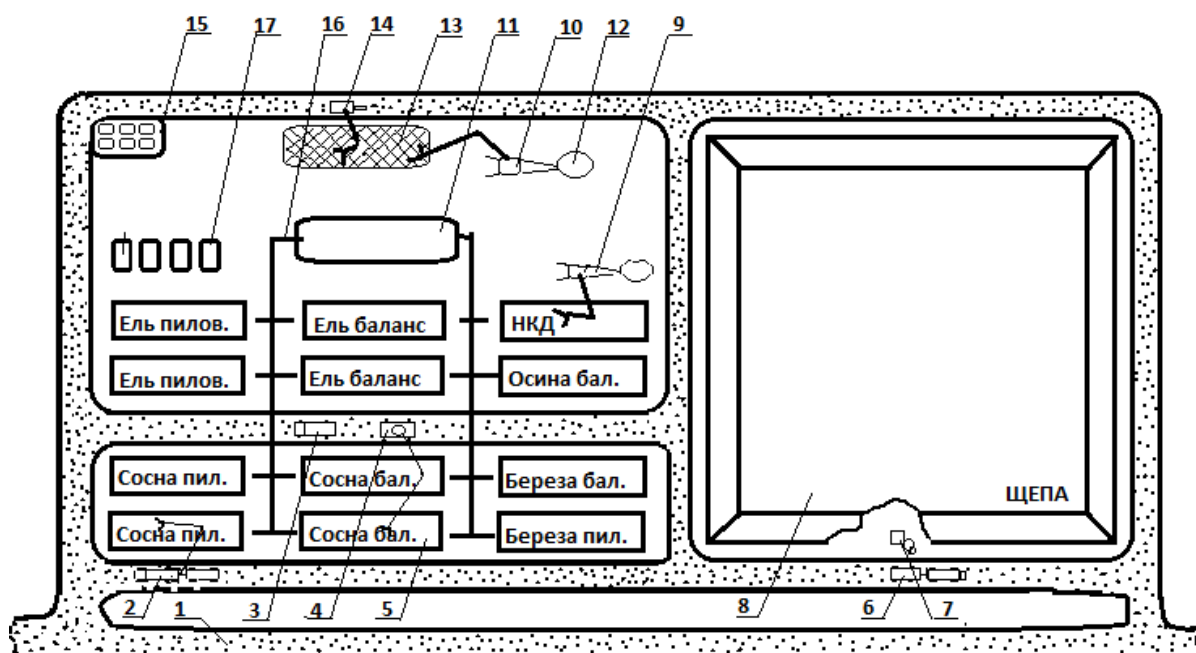


Рис. 2. Схема организации двухфункционального терминала с сортированием сортиментов и складированием щепы в кучу:
 1 – магистраль; 2 – большегрузный лесовоз; 3 – лесовоз Урал;
 4 – перегрузчик; 5 – штабель сортиментов; 6 – большегрузный автощеповоз; 7 – погрузчик щепы; 8 – куча щепы; 9 – рубительная машина для НКД; 10 – рубительная машина для лесосечных отходов;
 11 – бассейн; 12 – промежуточная куча щепы; 13 – лесосечные отходы; 14 – форвардер с лесосечными отходами; 15 – склад ГСМ;
 16 – система полива штабелей; 17 – бытовки.

Заключение.

Рассматриваемые одно- и двухфункциональные терминалы на лесосеке выполняют функцию перегрузки сортиментов и топливной щепы в штабели и кучу и загрузки их в большегрузные автомобили-лесовозы и автощеповозы, что позволяет расширить круг потребителей лесной продукции и перевозить сортименты и топливную щепу на расстояние до 250 км, а также стабилизировать доставку грузов даже в межсезонный период.

Библиографический список

1. Бачериков И.В., Теплов А.В., Локишанов Б.М., Танасюк Т.В. Терминалы для производства и хранения щепы из лесосечных отходов // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы

международной науч.-техн. конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2016. С. 105-108.

2. Локиштанов Б.М., Жуков В.И. Транспортные системы лесного комплекса: учебное пособие. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2012. – 120 с.

3. Жуков В.И., Локиштанов Б.М., Сюзев А.В. Влияние современных климатических изменений на сроки вывозки древесины в Северо-Западном регионе // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2022. – № 241. – С. 98–112.

4. ГОСТ 2292-88. Лесоматериалы круглые. Маркировка, сортировка, транспортирование, методы измерения и приемка. – Введ. 1991-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2005. – 12 с.

5. ГОСТ Р 55116-2012. Биотопливо твердое. Технические характеристики и классы топлива. Часть 4. Щепа для непромышленного использования. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 12 с.

6. Селиверстов А.А., Герасимов Ю.Ю., Суханов Ю.В. [и др.] Оценка эффективности производства топливной щепы на лесном терминале // Тракторы и сельхозмашины, 2012.

7. – № 8. – С. 2527.

Сведения об авторах

ФИО	Козлова Ирина Константиновна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	4547 - 5711
e-mail	kozlova.ik@mail.ru

ФИО	Орлов Виталий Владимирович
Организация	Военная академия связи им. С.М. Буденного
Адрес организации	194064, Тихорецкий проспект, 3 Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	7858-2792
e-mail	artictvetal1987@gmail.com

ФИО	Локштанов Борис Моисеевич
Организация	-
Адрес организации	195256, ЖСК87, пр. Науки, 43, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	4014-2820
e-mail	blokshtanov@mail.ru

Аннотация

В статье рассматривается проблема обеспечения бесперебойной отгрузки круглых лесоматериалов потребителям в условиях увеличения межсезонных периодов (весенней и осенней распутицы) до 1,5–2 месяцев в Северо-Западном регионе РФ. Для решения данной проблемы предложена организация специализированных перегрузочных терминалов на лесосеке. Выполнен расчет объемов складирования древесины на одно- и двухфункциональных терминалах при годовом объеме заготовки 300 тыс. пл.м³. Определены рациональные параметры штабелей круглых лесоматериалов с учетом породного состава и качества древесины, а также обоснованы объемы складирования топливной щепы из лесосечных отходов и низкокачественной древесины. Установлено, что применение перегрузчика позволяет формировать штабели высотой до 12 м, обеспечивая размещение 15 штабелей сортиментов, дифференцированных по породам и назначению. На двухфункциональном терминале общий объем хранения топливной щепы может достигать 120 тыс. нас. м³. Результаты исследования позволяют адаптировать технологию складирования к изменяющимся климатическим условиям, расширить радиус отгрузки продукции до 250 км и обеспечить стабильное снабжение потребителей в течение всего года.

Ключевые слова: лесной терминал, перегрузочный пункт, круглые лесоматериалы, сортименты, штабель, межсезонный период, распутица, объем складирования, топливная щепа, лесосечные отходы, низкокачественная древесина, перегрузчик.

УДК: 630.848

Разделы рубрикатора ГРНТИ: 68.03.07

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛИГНИНА ДЛЯ УКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Круль Т.А., Силецкий В.В.

Введение.

Строительство лесовозных дорог на слабых грунтах остается одной из ключевых проблем транспортной инфраструктуры, особенно в условиях Российской Федерации с ее обширными территориями. Традиционные методы стабилизации – цементирование, известкование, обработка битумными эмульсиями – хотя и применяются повсеместно, но сопряжены с высокими энергозатратами, значительной стоимостью и экологическими рисками. Производство традиционных вяжущих сопровождается эмиссией оксидов азота и углерода, что ведет к загрязнению прилегающих территорий и акваторий. В этой закономерности возникает интерес к альтернативным материалам, и среди них – лигнин.

Лигнин представляет собой природный полимер, крупнотоннажный побочный продукт целлюлозно-бумажной и гидролизной промышленности [1]. Ежегодный мировой объем производства лигносульфонатов и гидролизных лигнинов превышает 50 млн. т, при этом значительная часть этих отходов не находит квалифицированного применения. Вопросы утилизации промышленных отходов, в том числе различных видов шламов, в контексте дорожного строительства поднимались и ранее [2], однако комплексных решений до сих пор не предложено.

В дорожном строительстве лигнин используется для стабилизации супесей, суглинков и илистых грунтов. Механизм действия основан на формировании цементоподобных связей между минеральными частицами, что повышает несущую способность основания, снижает эрозионные процессы, водопоглощение и пылеобразование. Последнее особенно критично для лесовозных дорог, эксплуатируемых в условиях интенсивного движения тяжелой техники. Экспериментально подтверждено: введение лигнина в концентрации до 12 % от массы грунта увеличивает твердость покрытия, модуль деформации и сопротивление сдвигу. Это позволяет эксплуатировать грунтовые основания без применения дорогостоящих материалов – бетона или асфальта.

Лесопромышленный комплекс России, ежегодно produцирующий миллионы тонн лигнина, потенциально способен решить две задачи одновременно: утилизировать собственные отходы и заместить импортируемые вяжущие компоненты. Результаты полевых испытаний

показывают, что грунты, обработанные лигнином, выдерживают осевую нагрузку до 10 т, сохраняя устойчивость при отрицательных температурах и в условиях повышенного увлажнения [3].

Цель работы – систематизировать и сопоставить результаты экспериментальных исследований по применению лигнина и его производных для стабилизации грунтов, установить характер зависимости физико-механических свойств укрепленных смесей от концентрации добавки и типа грунта, а также определить диапазоны эффективного дозирования.

Методы исследования.

Выполнен структурный анализ опубликованных научных работ, посвященных применению лигносульфонатов в качестве стабилизирующих агентов для укрепления грунтов при строительстве лесных автомобильных дорог.

Результаты исследования.

Лигносульфонат технический (ЛСТ) в дорожном строительстве применяют давно – и в России, и за рубежом [4,5]. Еще в середине прошлого века Гипродорнии, ВНИИжелезобетон и отраслевые НИИ целлюлозно-бумажной промышленности закладывали первые опыты по обработке дорог лигносульфонатами. С тех пор накопился большой объем экспериментальных данных. Подтвердилось главное: ЛСТ работает как доступный стабилизатор для супесей, суглинков и гравийных материалов. Особенно это важно для лесных и сельских территорий, где другие варианты часто упираются в стоимость [6].

Чтобы повысить водостойкость лигносульфонатов, Гипродорнии совместно с Пермским филиалом ВНПОбумпрома разработали состав «Лигнодор». Это соли лигносульфоновых кислот, модифицированные хлористым кальцием и нейтрализованные аммиачной водой. Лабораторные и полевые испытания показали: растворимость «Лигнодора» в два раза ниже, чем у обычного ЛСТ, а прочность на сжатие – почти вдвое выше [3]. Гравийные покрытия с «Лигнодором» изнашиваются в 6-7 раз меньше необработанных [3]. Кроме того, состав предотвращает пылеобразование в течение 45 дней и сохраняет ровность покрытия.

В Ленинградской лесотехнической академии предложили комбинировать ЛСТ с другими промышленными отходами - например, с растворимой древесной смолой или нефтешламом [6]. Такие композиции, по данным авторов, лучше удерживают влагу.

Отдельное направление – цементогрунты с добавкой ЛСТ. В работе [4] исследовали песчаные грунты с ЛСТ и цементом. Авторы построили

нейронечеткую модель для прогнозирования предела прочности на сжатие. Входные параметры: содержание портландцемента, содержание ЛСТ, число пластичности грунта. Оптимальные значения, полученные по модели, – 0,85 % ЛСТ и 9,5 % цемента от массы грунта. Прочность на сжатие в этом случае достигает 5,59 МПа за счет пластифицирующего эффекта [5].

Детальные лабораторные испытания провели на тяжелом пылеватом суглинке с площадки строительства лесовозной дороги в Свердловской области. Исходный грунт имел влажность 10–12 % – типичную для глинистых почв с низкой несущей способностью. Добавка водного раствора ЛСТ работает как пластификатор: диспергирует частицы, снижает поверхностное натяжение воды, помогает сформировать более плотную структуру при уплотнении.

В серии опытов концентрацию ЛСТ меняли от 0 до 1,25 % от сухой массы грунта. Образцы – цилиндры диаметром 50 мм и высотой 50 мм – формовали под давлением 15 МПа в течение трех минут, затем насыщали водой 48 часов по ГОСТ Р 70452–2022 [8]. Максимальная прочность зафиксирована при концентрации ЛСТ 0,75 % [6]. Оптимальная влажность смеси при этом снизилась с 25 до 21 %, что говорит об улучшении водоотдачи и уплотняемости.

Заключение.

Проведенный анализ литературных данных подтверждает эффективность применения технических лигносульфонатов (ЛСТ) для стабилизации супесчаных, суглинистых и гравийных грунтов при строительстве лесовозных дорог [2-6].

Установлено, что модифицированные составы на основе ЛСТ позволяют целенаправленно улучшать физико-механические характеристики грунтов. Введение ЛСТ в концентрациях от 0 до 1,25 % от массы сухого грунта (в том числе в комбинации с цементом) обеспечивает прирост прочности на сжатие, снижение водопоглощения и истираемости покрытий [3,5,7]. Эмпирически подтверждена способность стабилизированных грунтов выдерживать эксплуатационные нагрузки до 10 т/ось в течение нескольких сезонов [3].

Вместе с тем, представленные в литературе результаты получены для конкретных типов грунтов и лигнинов, что ставит вопрос о воспроизводимости данных на региональных материалах. Решение этой задачи является целью дальнейших экспериментальных исследований.

Библиографический список

1. Глазунова М.Г. Образование лигнофенолоформальдегидных смол при среднем содержании щёлочи в реакционной смеси // Лесотехнический журнал, 2025. – Т. 15. – № 1(57). – С. 72-90.
2. Zhang T., Cai G., Liu S. Application of lignin-based by-product stabilized silty soil in highway subgrade: A field investigation // Journal of Cleaner Production, 2017. – Vol. 142. – Part 4. – P. 4243-4257.
3. Розов Ю.Н. Применение лигнодора для повышения транспортно-эксплуатационных показателей // Эксплуатация автомобильных дорог : сборник научных трудов. – Омск: ОмПИ, 1989. – С. 176.
4. Мотовилов Б.П. Исследования по обеспыливанию грунтов в лабораторных условиях // Лесосечные, лесоскладские работы и сухопутный транспорт леса. – Ленинград: ЛТА, 1980. – Вып. 9. – С. 42-44.
5. Ладейщиков Н.В., Чудинов С.А., Ладейщиков К.В., Анастас Е.С. Нейронечеткая сеть для расчета прочности цементогрунта с добавлением лигносульфоната в конструкции лесовозных лесных дорог // Системы. Методы. Технологии, 2025. – № 3 (67). – С. 123-130.
6. Ладейщиков Н.В., Чудинов С.А. Рациональное использование местных грунтов при строительстве конструктивных слоев лесных дорог // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы XX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2024. – С. 897-902.
7. Силецкий В.В. Укрепление грунтов лесных дорог с использованием комбинированной смеси нефелинового шлама, грунта и гидроксида калия // Оптимизация лесопользования: материалы всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием, посвященной 70-летию Почетного работника высшего образования, Заслуженного лесовода России Залесова Сергея Вениаминовича. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2023. – С. 348-354.
8. ГОСТ Р 70452-2022. Дороги автомобильные общего пользования. Грунты стабилизированные и укрепленные неорганическими вяжущими. Общие технические условия; введ. 2023-01-01. – Москва: ФГБУ «Институт стандартизации», 2022. – 24 с.

Сведения об авторах

ФИО	Круль Татьяна Алексеевна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	krul.tatjana@yandex.ru

ФИО	Силецкий Вадим Витальевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	4495-0838
e-mail	lol.spairo@yandex.ru

Аннотация

Рассмотрена возможность использования лигносульфонатов технических (ЛСТ) – отхода целлюлозно-бумажной промышленности – для стабилизации грунтов при строительстве лесовозных дорог. Выполнены анализ и систематизация данных отечественных и зарубежных исследований. Показано, что введение ЛСТ позволяет повысить физико-механические характеристики грунтов. Обоснована необходимость верификации полученных зависимостей для региональных типов грунтов, что определяет направление дальнейших исследований авторов.

Ключевые слова: лесовозные дороги, стабилизация грунтов, лигносульфонаты технические, физико-механические свойства.

УДК 630*381.2

Раздел рубрикатора ГРНТИ 66.17.15

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЛЕСНЫХ ДОРОГ

Миронов А.А, Василюк К.Д.

Введение.

Строительство лесных автомобильных дорог ведется преимущественно в условиях слабых и переувлажненных грунтов. Для них характерны пониженная несущая способность и высокая чувствительность к увлажнению и сезонным колебаниям температуры. В таких инженерно-геологических условиях устойчивость земляного полотна становится определяющим фактором долговечности дорожной конструкции и эксплуатационной надежности транспортной инфраструктуры лесного комплекса.

Традиционные методы стабилизации базируются на минеральных вяжущих – цементе и извести [1]. Они формируют структурно-прочные связи за счет ионного обмена, флокуляции и пуццолановых реакций. Однако технологии сопряжены с ограничениями: ростом оптимальной влажности при уплотнении, риском трещинообразования, снижением морозостойкости отдельных типов грунтов и значительным углеродным следом производства. В удаленных лесных территориях добавляются затраты на транспортировку материалов.

В последние годы внимание смещается к альтернативным подходам – органическим и органоминеральным добавкам, включая композиции из отходов полимерной промышленности и биополимеры природного происхождения [2, 3]. Предполагается, что такие материалы не только повышают прочностные характеристики, но и улучшают морозостойкость, позволяя снизить расход традиционных вяжущих и одновременно решать задачи утилизации или использования возобновляемого сырья.

Несмотря на обилие экспериментальных данных по отдельным типам стабилизаторов, результаты разрозненны и часто рассматриваются вне единой методологической рамки. Недостаточно систематизированы сведения о различиях в механизмах действия органических и минеральных добавок, их влиянии на пластичность, и прочность, а также о технологических и экологических ограничениях.

Цель работы – сравнительный анализ технологий стабилизации грунтов лесных дорог с использованием органических, органоминеральных и минеральных добавок.

Методы исследования.

Настоящий обзор выполнен на основе систематического анализа опубликованных научных исследований, посвящённых стабилизации грунтов при строительстве лесных автомобильных дорог с использованием минеральных, органоминеральных и органических добавок [1-6].

Результаты исследования.

Применение промышленных отходов в стабилизирующих композициях решает одновременно инженерные и экологические задачи. В ряде исследований рассмотрены продукты пиролиза полимеров [2], пылевидные фракции керамического производства, побочные продукты химической промышленности [4,5], а также их комбинации с минеральными вяжущими. Эффективность таких систем детерминируется типом грунта и характером межкомпонентного взаимодействия.

Пылевидные отходы керамической промышленности. Обходная зола и пылевидные фракции обладают низкой самостоятельной активностью: их введение без активаторов незначительно меняет прочностные характеристики грунта. Однако в многокомпонентных системах они выполняют функцию минерального заполнителя, участвуя в пуццолановых реакциях в щелочной среде [4, 5]. В комбинации с пиролизными восками и щелочными активаторами фиксируется синергетический эффект, выражающийся в росте прочности и снижении водопоглощения [2]. Для глинистых грунтов такие композиции уменьшают капиллярный подъем влаги, что значимо для условий повышенной влажности.

Побочные продукты химической промышленности. Отработанная серная кислота и гидроксид натрия рассматриваются преимущественно как активаторы [4]. Самостоятельное введение кислоты в песчаные грунты способно снижать прочность из-за частичной деструкции цементного камня; в глинистых грунтах значимого упрочнения не происходит. При совместном использовании с восковыми эмульсиями [2] щелочная среда интенсифицирует реакции между минеральными частицами и полимерной фазой, улучшая диспергирование и закрепление последней. Это позволяет формировать устойчивые структурные связи, особенно в глинах, при условии точного дозирования. Чувствительность к передозировке ограничивает технологическую простоту таких компаундов.

Пиролизные масла и полимерные отходы иного происхождения. Пиролизное масло из отходов шин умеренно повышает прочность песчаных грунтов, снижая водопоглощение и повышая морозостойкость за счет гидрофобизации пор [2]. Данные по его влиянию на глинистые грунты фрагментарны. Отходы специфического состава (например, эмульсии на

основе отходов жевательной резинки) показывают нестабильные результаты: в песках возможно снижение прочности, в глинах – положительный эффект в композициях [2], что указывает на высокую зависимость результата от реологических свойств полимерной фазы.

Эффективность стабилизации отходами определяется не столько природой отдельного компонента, сколько корректностью многокомпонентной рецептуры. Устойчивые результаты достигаются при комбинировании: гидрофобизатора [2]; химического активатора [4, 5]; минерального наполнителя. Для песков приоритетен механизм снижения водопроницаемости, для глин – химическая активация и структурообразование. Системы характеризуются технологической сложностью, чувствительностью к соотношению компонентов и необходимостью контроля качества смеси, что ограничивает их применение в полевых условиях без специализированного оборудования.

Ужесточение экологических требований к дорожному строительству активизирует поиск альтернатив традиционным минеральным вяжущим [1]. В фокусе внимания оказываются биополимеры природного происхождения, способные формировать структурные связи в дисперсных системах при минимальном углеродном следе. Наиболее изученным представителем этой группы является наноальгинат натрия – производное альгиновой кислоты из бурых водорослей [3].

Влияние на пластичность и структуру. При стабилизации высокопластичных глин наноальгинат натрия снижает показатель пластичности за счет одновременного уменьшения предела текучести и роста предела пластичности [3]. Наблюдаемая трансформация свидетельствует о переходе структуры от высокодисперсной, водочувствительной к агрегированной. В отличие от известки [1], где эффект ограничен ионным обменом, биополимер формирует пространственную полимерную сеть, частично блокирующую активные центры глинистых частиц.

Прочность при сжатии. Экспериментально подтвержден устойчивый рост прочности при одноосном сжатии с увеличением концентрации биополимера [3]. Зависимость «дозировка–прочность» носит монотонный характер, в отличие от известки [1] с ее выраженным оптимумом и последующим спадом эффективности. Это отражает различие в механизмах: пуццолановые реакции против комбинации ионного обмена, флокуляции и гелеобразования, формирующего полимерно-минеральный каркас.

Кинетика твердения. Оба типа стабилизаторов демонстрируют рост прочности во времени, но характер набора различен. Для извести [1] характерно постепенное развитие пуццолановых реакций. Для наноальгината [3] – быстрое формирование гелеобразной структуры, обеспечивающее более высокую начальную прочность с последующим умеренным приростом.

Принципиальные различия сводятся к следующему: известь действует через химическую активацию и минеральную цементацию с узким диапазоном оптимальных дозировок [1]; биополимер – через формирование полимерно-минерального каркаса с более стабильной зависимостью от дозировки, обеспечивая лучшие параметры уплотнения и возобновляемость сырья. Вместе с тем известь остается технологически освоенным реагентом с предсказуемым поведением, тогда как биополимеры находятся на стадии накопления экспериментальной базы.

Заключение.

Выполненный анализ показывает, что эффективность стабилизации грунтов при строительстве лесных дорог определяется совокупностью физико-химических механизмов, типом грунта и условиями эксплуатации, а не принадлежностью стабилизатора к минеральной или органической группе. Минеральные вяжущие сохраняют значение как технологически освоенные материалы с прогнозируемым поведением, обеспечивающие структурную перестройку грунтов за счет ионного обмена и пуццолановых реакций [1]. Их применение сопряжено с ограничениями: чувствительностью к дозировке, ростом водопотребности на отдельных типах грунтов и экологическими издержками производства.

Композиции на основе промышленных отходов демонстрируют потенциал повышения прочности и морозостойкости при условии корректно подобранной многокомпонентной рецептуры [2, 4, 5]. Эффект обусловлен синергией гидрофобизирующих, активирующих и минеральных компонентов. Однако высокая зависимость результата от состава и точности приготовления ограничивает универсальность таких решений. Биополимерные стабилизаторы обеспечивают выраженное снижение пластичности высокодисперсных грунтов, рост прочности и уменьшение оптимальной влажности уплотнения [3]. Формирование полимерно-минерального каркаса представляет альтернативный механизм структурообразования. Масштабируемость технологии, долговременная устойчивость и комплексная оценка жизненного цикла требуют дополнительного изучения.

Перспективные направления исследований включают: длительные натурные испытания в условиях циклического увлажнения и замораживания; унификацию методик сравнительной оценки стабилизаторов; оценку эффективности.

Библиографический список

1. *Galván Rodríguez C.R.* Lime stabilization of clay minerals and soils // *Engineering Geology*, 1996. – Vol. 46. – № 3-4. – P. 275-288.
2. *Kuligowski K., Cenian A., Kazimierski P., Waciński W., Zajac M., Falkowski J.* Application of wax-based emulsions from the pyrolysis of plastic waste in soils stabilization prior to road construction, 2022. – 22 p.
3. *Mousavi F.* Forest Road Subgrade Improvement by Lime and Sodium Nanoalginate Used as Stabilizers for Clay Soils // *Forests*, 2023. – Vol. 14, № 7. – Article 1332.
4. *Силецкий В.В., Смирнова В.Н.* Применение гидроксида натрия в лесном дорожном строительстве // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы девятой всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием. – Петрозаводск: ПетрГУ, 2023. – С. 155-156.
5. *Силецкий В.В., Смирнова В.Н.* Применение щелочей в лесном дорожном строительстве: перспективы и ограничения // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2022 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2023. – С. 64-69.
6. *Силецкий В.В.* Повышение долговечности лесных дорог при применении шламогрунтов в качестве морозозащитных слоев земляного полотна // Инженерные кадры - будущее инновационной экономики России, 2019. – № 5. – С. 100-103.

Сведения об авторах

ФИО	Миронов Алексей Андреевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	leward@vk.com

ФИО	Силецкий Вадим Витальевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	4495-0838
e-mail	lol.spairo@yandex.ru

Аннотация

В статье представлен сравнительный анализ современных методов стабилизации грунтов при строительстве лесных дорог. Рассматриваются традиционные минеральные вяжущие, композиционные добавки на основе промышленных отходов и биополимеры. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения несущей способности переувлажненных грунтов в условиях ограниченной транспортной доступности лесных территорий. Установлено, что применение биополимеров позволяет снизить пластичность глин и повысить прочность, однако требует дальнейших натурных испытаний.

Ключевые слова: лесные дороги, стабилизация грунтов, композиционные добавки, промышленные отходы, биополимеры, несущая способность.

УДК 630*381.2

Раздел рубрикатора ГРНТИ 66.17.15

ТРАНСФОРМАЦИЯ ХАРВЕСТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ: ОТ МОТОРНОЙ ПИЛЫ К ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМУ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНОМУ КОМПЛЕКСУ

Науман А.И., Кокорева С.В.

Введение.

Лесозаготовительная отрасль на протяжении последних семи десятилетий пережила глубинную технологическую трансформацию. Центральное место в этом процессе заняла эволюция харвестера –

многофункциональной машины, объединившей операции валки, обрезки сучьев, раскряжевки и сортировки древесины. Путь от моторной пилы, требовавшей значительных физических усилий и высокой квалификации вальщика, до современного интеллектуального комплекса, оснащенного системами машинного зрения и искусственного интеллекта, отражает общие закономерности развития техники в условиях цифровизации промышленности.

Несмотря на обилие публикаций, посвященных отдельным аспектам лесозаготовительной техники, целостное историко-техническое осмысление трансформации харвестерных технологий остается недостаточно проработанным. Понимание логики этого развития необходимо не только для научной систематизации накопленного опыта, но и для обоснованного прогнозирования дальнейших направлений модернизации отрасли.

Цель работы – выявить этапы и ключевые факторы технологической трансформации харвестерной техники от ручных инструментов до интеллектуальных автоматизированных комплексов.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. провести ретроспективный анализ развития средств механизации лесозаготовок и определить переломные моменты эволюции;
2. систематизировать конструктивные и функциональные изменения харвестерного оборудования по историческим этапам;
3. охарактеризовать современное состояние харвестерных технологий с позиции уровня автоматизации и цифровой интеграции;
4. предложить периодизацию развития харвестерной техники и определить перспективные направления ее совершенствования.

Методы исследования.

В работе использован историко-технический подход, позволивший проследить закономерности развития харвестерной техники. Исследование опиралось на ретроспективный анализ патентной документации, технических описаний машин и отраслевых обзоров за период с 1950-х годов по настоящее время. Систематизация данных выполнялась методом структурно-функционального анализа, в рамках которого харвестер рассматривался как комплекс взаимосвязанных подсистем: ходовая часть, манипулятор, харвестерная головка и система управления.

Сравнительный анализ проводился по поколениям машин ведущих производителей – Komatsu Forest, John Deere, Ponsse, Rottne. Сопоставление осуществлялось по уровню автоматизации, степени интеграции электронных систем и функциональным возможностям оборудования.

Информационную базу составили материалы выставок Elmia Wood и Lesdrevmash, техническая документация производителей, научные публикации и аналитические обзоры. Достоверность результатов обеспечена репрезентативностью источников и согласованностью выводов с независимыми отраслевыми исследованиями.

Результаты исследования.

В ходе проведенного анализа выделены четыре ключевых этапа трансформации харвестерных технологий, каждый из которых характеризуется определенным уровнем автоматизации, функциональными возможностями и ролью человека в технологическом процессе.

Первый этап (1950–1970 гг.): эпоха механизации. Трансформация лесозаготовительных технологий началась с внедрения моторной пилы, которая постепенно вытеснила ручную поперечную пилу и топор. Однако на данном этапе технологический процесс оставался дискретным: операции валки, обрезки сучьев и раскряжевки выполнялись последовательно с применением ручного труда [1]. Вся полнота ответственности за качество и безопасность работ возлагалась на оператора, который выступал одновременно исполнителем и лицом, принимающим технологические решения. Появление первых гидравлических манипуляторов и валочно-пакетирующих машин в 1960-х годах создало технические предпосылки для последующего объединения операций. Именно в этот период в Швеции и Финляндии были разработаны первые прототипы харвестерных головок, способных совмещать функции захвата, валки и обрезки сучьев [2].

Второй этап (1970–1990 гг.): становление харвестерных технологий. Этот период ознаменовался принципиальным переходом от отдельного выполнения операций к их совмещению в одной многофункциональной машине. Серийное производство харвестеров под марками Bruunett, Lokomo и Valmet положило начало новой технологической эпохе. Конструктивные решения этого этапа включали разработку универсальных харвестерных головок с гидравлическим приводом, внедрение систем активного позиционирования рабочего органа, а также переход от колесных тракторных баз к специализированным шарнирно-сочлененным шасси, обеспечивающим высокую проходимость в лесных условиях. К концу этапа сформировалась классическая архитектура харвестера, включающая ходовую часть, гидравлический манипулятор и харвестерную головку, которая сохранилась в своей основе до настоящего времени. Уровень автоматизации оставался невысоким и ограничивался гидравлической стабилизацией рабочих органов, тогда как основные технологические решения принимались оператором.

Третий этап (1990–2010 гг.): автоматизация и компьютеризация. Ключевым фактором трансформации на этом этапе стало широкое внедрение электронных систем управления, что обусловило переход от чисто гидравлического управления к электронно-гидравлическому (ЕН-управление). Технологический прорыв обеспечила интеграция бортовых компьютеров, позволившая автоматизировать процесс раскряжевки на основе программно заданных спецификаций сортиментов. Дополнительные инновации включали системы автоматического позиционирования манипулятора, спутниковую навигацию GPS/ГЛОНАСС для контроля местоположения и учета выработки, а также первые системы дистанционного мониторинга технического состояния, положившие начало флот-менеджменту. В этот период харвестер окончательно трансформировался из механической машины в сложную человеко-машинную систему, где оператор выполнял функции управления и контроля при автоматизированном исполнении большинства технологических операций [3].

Четвертый этап (2010 г. – настоящее время): интеллектуализация и цифровая интеграция. Современный этап развития характеризуется переходом к интеллектуальным лесозаготовительным комплексам, в которых автоматизация достигла уровня, позволяющего оператору выполнять преимущественно стратегические функции контроля и управления исключительными ситуациями. Рутинные операции, такие как раскряжевка, позиционирование манипулятора и учет заготовленной древесины, осуществляются автоматическими системами на основе искусственного интеллекта и машинного зрения.

Систематизация основных изменений функциональных характеристик харвестерной техники по выделенным этапам представлена в табл. 1.

Табл. 1. Эволюция функциональных характеристик харвестерной техники

Этап	Период	Ключевые технологические решения	Уровень автоматизации
I	1950–1970	Моторная пила, отдельное выполнение операций	0%
II	1970–1990	Гидравлическая харвестерная головка, шарнирно-сочлененное шасси	15–20%
III	1990–2010	Бортовой компьютер, ЕН-управление, GPS-мониторинг	40–50%
IV	2010 – н.в.	Искусственный интеллект, машинное зрение, облачные платформы	70–85%

Современный харвестер представляет собой интеллектуальный комплекс, интегрированный в единое цифровое пространство лесозаготовительного предприятия. Данные о каждом срубленном дереве, включающие породу, диаметр, длину и объем, в режиме реального времени передаются в облачные платформы для планирования, учета и управления цепочками поставок. Системы машинного зрения, базирующиеся на лазерном сканировании и многокамерных оптических системах, устанавливаемые непосредственно в харвестерной головке, обеспечивают автоматическое распознавание породы древесины, выявление скрытых дефектов, таких как внутренняя гниль или сучковатость, а также оптимизацию раскроя с учетом актуальных рыночных спецификаций. Нейросетевые алгоритмы, обучаемые на массивах данных, накопленных в процессе эксплуатации, позволяют повысить выход целевых сортиментов на 5–12% по сравнению с традиционными методами раскряжевки [4].

Важнейшим направлением современного этапа стало развитие телематики — систем непрерывного мониторинга параметров работы и технического состояния узлов машин. Предиктивное обслуживание, основанное на анализе больших данных и выявлении предвестников отказов, обеспечивает снижение внеплановых простоев на 15–20% и увеличение межремонтного ресурса оборудования. Параллельно развиваются технологии дистанционного управления и элементы автономности, открывающие перспективы вывода оператора из опасной зоны и организации лесозаготовительных работ в сложных климатических и ландшафтных условиях, где присутствие человека сопряжено с повышенными рисками.

Заключение.

Проведенное исследование позволило выявить закономерности трансформации харвестерных технологий от простейших механических инструментов до интеллектуальных лесозаготовительных комплексов.

В истории развития харвестерной техники выделены четыре ключевых этапа: механизация ручного труда (1950–1970 гг.), становление многооперационных машин (1970–1990 гг.), компьютеризация и автоматизация (1990–2010 гг.), интеллектуализация и цифровая интеграция (2010 г. — настоящее время). Каждый этап характеризовался сменой доминирующих технологических укладов — от гидравлики к электронике, а затем к цифровым интеллектуальным системам [5].

Основным вектором трансформации является последовательное замещение человеческого труда в операциях валки, обрезки сучьев, раскряжевки и планирования. На современном этапе оператор выполняет преимущественно функции стратегического контроля, тогда как тактические и исполнительские задачи решаются автоматизированными системами на основе искусственного интеллекта.

Дальнейшее развитие харвестерных технологий, по-видимому, будет определяться тремя перспективными направлениями. Во-первых, это полная автономизация харвестерных комплексов с возможностью удаленного управления и группового взаимодействия машин. Во-вторых, глубокая интеграция с системами прецизионного лесного хозяйства и технологиями 3D-планирования лесосечных работ. В-третьих, внедрение гибридных и электрических силовых установок, направленное на снижение экологической нагрузки и повышение энергоэффективности.

Трансформация харвестерных технологий представляет собой яркий пример перехода лесозаготовительной отрасли к принципам «Индустрии 4.0», где ключевыми факторами конкурентоспособности становятся не

только производительность и надежность техники, но и уровень ее цифровой интеграции и интеллектуальной автономности.

Библиографический список

1. Герасимов Ю.Ю., Сюнев В.С. Технология лесозаготовительных работ. – Йоэнсуу: Издательство университета Восточной Финляндии, 2019. – 248 с.
2. Sundberg, U., Silversides C.R. Operational efficiency in forestry. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988. – 219 p.
3. Онегин В.И., Панюхин Н.А. Автоматизация лесозаготовительных машин. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2017. – 184 с.
4. Пахучий В.В., Кузьмина Е.Н. Цифровая трансформация лесного хозяйства // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2024. – № 247. – С. 201–218.
5. Кожухов Н.И., Жуков А.В. История развития лесозаготовительной техники в России // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11, № 3. – С. 112–126.

Сведения об авторах

ФИО	Науман Анита Ивановна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	anita.naumanr@bk.ru

ФИО	Кокорева Софья Валерьевна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	sofi.kokoreva1313@gmail.com

Аннотация

В статье представлен историко-технический анализ развития харвестерной техники как основного элемента механизации лесозаготовительного производства. Рассмотрены ключевые этапы эволюции: от применения моторной пилы и ручного труда до современных автоматизированных харвестерных комплексов, интегрированных в цифровую среду планирования и управления. Выявлены основные технологические переходы, определившие современный облик лесозаготовительной техники. Особое внимание уделено современному этапу цифровизации, характеризующемуся внедрением систем машинного зрения, автоматической раскряжевки и дистанционного мониторинга. На основе анализа технических решений предложена периодизация развития харвестерных технологий и определены перспективные направления дальнейшего совершенствования.

Ключевые слова: харвестер, лесозаготовительная техника, эволюция технологий, автоматизация лесозаготовок, бензопила, машинное зрение, цифровизация лесного хозяйства.

УДК 630*36:621.9

Разделы рубрикатора ГРНТИ 81.95.01

ИННОВАЦИОННЫЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИИ

Иванова И.В.

Введение.

Основные населенные пункты и города Российской Федерации расположены в основном в климатической зоне с умеренной и низкой среднегодовой температурой, в связи, с чем отопительный период в них продолжается с октября по май. Для качественного теплоснабжения в нашей стране требуется огромное количество топливных ресурсов. Суммарная выработка тепловой энергии на нужды теплоснабжения в стране составляет примерно 1,9 млрд. МВт. С помощью централизованных систем теплоснабжения тепловой энергией обеспечиваются порядка 70 % всех потребителей в стране, причем выработка тепловой энергии осуществляется, в основном, на водогрейных котельных (примерно 70 %), и, только 30 % вырабатывается на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) на базе когенерации. По данным, приведенным в работе Салихова А.А. [1], в составе источников тепловой энергии действуют более 500 ТЭЦ, около 750 котельных мощностью свыше 100 МВт, около 3 000 котельных мощностью от 20 до 100 МВт, около 15 000 котельных мощностью от 3 до 20 МВт; более 50 000 котельных мощностью до 3 МВт, а также более 12 млн. индивидуальных тепловых установок. Теплота от этих источников передается по тепловым сетям протяженностью более 200 тыс. км в двухтрубном исполнении [1]. Это один из самых значимых и энергоемких секторов российской экономики, эффективность которой не может быть решена без повышения энергоэффективности обслуживающих систем теплоснабжения.

На современном уровне теплоснабжения в Российской Федерации в зависимости от размещения источника теплоты по отношению к тепловым потребителям применяются все три основных вида теплоснабжения: высокоцентрализованное, централизованное и децентрализованное. Первые два характеризуются наличием тепловых сетей, по которым теплоноситель доставляется от источника выработки теплоты к потребителю. Это сложные гидравлические схемы с многокилометровыми магистральными и

разветвленными трубопроводами. Среди важнейших проблем, поставленных перед наукой и практикой, особое место занимает проблема энергосбережения, которое поднято на уровень государственной политики [2 – 7].

Цель работы.

Целью данной работы является анализ использования современных теплоизоляционных материалов для уменьшения тепловых потерь при передаче тепловой энергии в целях решения задач энергосбережения в целом в системах теплоснабжения.

Методы исследования.

Использован метод экспериментального исследования технических характеристики инновационного теплоизоляционного материала – пеностекла.

Повышение цен на топливо неминуемо сказывается на себестоимости вырабатываемой Гкал теплоты, что приводит к разработке путей экономии тепловой энергии на всех этапах ее транспортировки, особенно в тепловых сетях. Одним из способов такой экономии является тепловая изоляции трубопроводов. В настоящее время к основным типам относят изоляции из прошивных минераловатных матов, из базальтового волокна, из армопенобетона (АПБ), пенополимербетонная (ППБ), пенополиуретановую (ППУ), пенополимерминеральную (ППМ) изоляции и другие.

В соответствии со СП 61.13330.2012 [8], основные технические характеристики различных теплоизоляционных изделий для трубопроводов теплосетей приведены в табл. 1.

Для тепло- и гидроизоляции трубопроводов появился высокоэффективный, долговечный и влагостойкий инновационный материал – пеностекло. В качестве основного сырья для изготовления пеностекла используется стеклбой бутылочного, оконного и других видов стекол. Следовательно, создание пеностекла сопровождается переработкой стекла в виде отхода, который является практически неразлагающимся и накапливающимся со временем.

Табл. 1. Основные характеристики теплоизоляционных материалов, применяющихся для изоляции трубопроводов тепловой сети

№ п/п	Наименование теплоизоляционного материала	Теплопроводность $\lambda_{из}$, Вт/(м · К)	Температурный диапазон применения, °С	Группа горючести
1	2	3	4	5
1	Маты минераловатные прошивные	0,041...0,032	от – 180 до + 450	негорючие
2	Маты и вата из супертонкого базальтового волокна без связующего	0,031...0,24	от – 180 до + 600	негорючие
3	Теплоизоляционные изделия из пенополистерола	0,032	от – 180 до + 70	Г3-Г4
4	Теплоизоляционные изделия из пенополимерминерала	0,044	от – 180 до + 150	Г2
5	Теплоизоляционные изделия из армопенобетона	0,05	от – 180 до + 180	Г2
6	Теплоизоляционные изделия из пенополиуретана	0,029...0,024	от – 180 до + 130	Г2-Г4
7	Теплоизоляционные изделия из пенополиэтилена	0,033	от – 70 до + 70	Г3-Г4

По структуре пеностекло состоит из изолированных мелких паро- и водонепроницаемых пузырьков. При влажности 100 % теплопроводность этого материала не меняется. Материал сохраняет все свои физические свойства практически в любых условиях. К основным свойствам пеностекла относятся: негорючесть, стойкость к кислотам, грызунам, насекомым и микроорганизмам, высокая прочность, простота обработки. Технические характеристики пеностекла представлены в табл. 2.

Табл. 2. Технические характеристики пеностекла

№ п/п	Физико-химические характеристики теплоизоляционного материала	Единица измерения	Величина
1	2	3	4
1	Плотность	кг/м ³	120...210
2	Теплопроводность при +25°C	Вт/(м · °C)	0,045...0,070
3	Предел прочности при сжатии	кПа	400...600
4	Предел прочности при изгибе	кПа	200...550
5	Предел прочности при растяжении перпендикулярноплоскости плиты	кПа	100...500
6	Деформация под сосредоточенной нагрузкой 1000 Н	мм	0,50....2,00
7	Температурный диапазон эксплуатации	°C	от +260 °C до +400 °C
8	Горючесть	–	НГ
9	Водопоглощение кратковременное	кг/м ²	не более 0,5
10	Водопоглощение долговременное	кг/м ²	не более 0,5
11	Паропроницаемость	мг/м·ч·Па	не более 0,002

Сравнительная оценка по ряду параметров пеностекла с наиболее распространенным теплоизоляционным материалом на практике минеральной ватой приведена в табл. 3.

Табл. 3. Сравнительная оценка теплоизоляционных материалов

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Пеностекло	Минеральная вата
1	2	3	4
1	Производитель/ торговая марка/страна (город)	ООО «КАММЕТ» / IZOSTEK / РФ (г. Красноярск)	ООО «ИЗОМИН» / ИЗОМИН / РФ (Московская обл., г. Ступино)
2	Плотность, кг/м ³	150	80
3	Предел прочности при сжатии, МПа	700	20
4	Коэффициент теплопроводности при $t = + 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ в условиях эксплуатации «А», Вт/(м · °C)	0,046	0,036
5	Водопоглощение при полном погружении на 24 часа, в % от объема, не более	1,9	Заполнение всех пустот водой, с полной потерей теплоизоляционных свойств
6	Водопоглощение при полном погружении на 28 суток, в % от объема, не более	2,7	Заполнение всех пустот водой, с полной потерей теплоизоляционных свойств
7	Паропроницаемость, мг/м · ч · Па	0,002	$\geq 0,3$
8	Группа горючести	НГ	НГ
9	Долговечность, лет	≥ 100	≤ 10
10	Необходимость использования металлической облицовки	Нет	Да

Данные табл. 3 показывают преимущество рассматриваемого материала. Также испытания теплоизоляционных свойств этих материалов на одной из котельных города Санкт-Петербурга показали возможность широкого использования пеностекла на практике. Монтаж образцов теплоизоляции проводили на трубопроводе подачи воды (диаметром $d = 159$ мм) от деаэратора к котлу ДКВр-6,5-13.

Расчет толщины тепловой изоляции проводился по формуле [8]:

$$\delta = \frac{d \cdot (B - 1)}{2}, \quad (1)$$

где d – наружный диаметр трубопровода, м; B – отношение наружного диаметра изоляционного слоя d , к диаметру трубопровода d .

Для испытуемых образцов толщина изоляции для исследуемых трубопроводов составила: минеральная вата $\delta = 50$ мм; пеностекло $\delta = 60$ мм. Температурная диагностика проводилась с использованием тепловизора, с помощью которого были произведены замеры распределения температуры на поверхности теплоизоляции и открытого участка трубопровода. Измерения показали, что различий в распределении температуры на поверхности конструкций из пеностекла и минеральной ваты не наблюдается.

Результаты и обсуждение исследований.

Однако, учитывая такие важные преимущества пеностекла как влагонепроницаемость, способность сохранять объем в течение всего времени эксплуатации – указывает на несомненные преимущества этого материала при изоляции конструкций различного назначения. Еще одним важным показателем является срок эксплуатации. Минеральная вата может прослужить около 25 лет, тогда как пеностекло может служить не менее 100 лет. Для оценки перспектив применения исследуемых материалов в котельных и на тепловых сетях систем теплоснабжения необходимо провести детальный анализ экономических показателей с учетом.

Заключение.

Таким образом, анализируя приведенные результаты можно сделать следующие выводы:

- 1) важным свойством пеностекла является его низкая водо- и паропроницаемость, достаточно долгий срок эксплуатации;
- 2) перспективность применения пеностекла в качестве теплоизоляции для различных объектов теплоэнергетики;
- 3) однако, необходимо провести исследования по определению эффективности использования пеностекла при различных климатических условиях.

Библиографический список

1. Салихов А.А. Неоцененная и непризнанная «малая» энергетика. – Москва: Новости теплоснабжения, 2009. – 173 с.

2. *Иванова И.В., Дейс А.Д.* Рациональное ресурсо- и теплоиспользование в лесной промышленности // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2019 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2020. – С. 119-127.

3. *Бандель А.Л., Иванова И.В.* Энергосбережение и энергоэффективность в Российской Федерации // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2019 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2020. – С. 193-198.

4. *Куликов А.А., Иванова И.В., Прохоров В.А.* Особенности выбора толщины цилиндрической теплоизоляции // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2020 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2021. – С. 216-222.

5. *Снежков В.А., Иванова И.В.* Актуальные проблемы ресурсосбережения в многоквартирных жилых домах РФ // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2021 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2022. – С. 153-158.

6. *Зотов А.Д., Иванова И.В.* Рациональное использование энергоресурсов в жилом секторе // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2021 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2022. – С. 166-171.

7. *Иванова И.В., Курбанов А.И.* Технические решения по электро- и теплоснабжению потребителей // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2024 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2025. – С. 137 – 144.

8. Свод правил: Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов: СП 61.13330.2012 – Взамен СНиП 41-03-2003; введ. 01.01.2013. – Москва: Росстандарт, 2012. – 60 с.

Сведения об авторах

ФИО	Иванова Ирена Викторовна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт- Петербург, Россия
SPIN-код	9424-7866
e-mail	irenalta@mail.ru

Аннотация

Выявлено, что для повышения энергосбережения в системах теплоснабжения объектов теплоэнергетики необходимо искать новые способы экономии топлива и снижать потери теплоты при передаче тепловой энергии. Одним из таких инновационных теплоизоляционных материалов является пеностекло, которое показывает свои преимущества по сравнению со многими широко применяемыми теплоизоляционными материалами.

Ключевые слова: система теплоснабжения, энергосбережение, теплоизоляционные материалы, минеральная вата; пеностекло.

УДК: 699.86

Раздел рубрикатора ГРНТИ: 67.15.55

СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГИЯ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Иванова И.В.

Введение.

Электрическая или тепловая энергия – это движущая сила любого производства, жизненная необходимость в повседневной жизни, что способствует развитию общества в целом. Однако в настоящее время при огромной численности населения и развитии технологических производств, потребление энергии одновременно становится потенциально опасным, так

как очевидно работа теплогенерирующих устройств приводит к загрязнению воздуха и воды, эрозией почвы и прочее. Все эти опасности неминуемо приводят к экологическим последствиям и изменению мирового климата. Человечество стоит перед выбором: с одной стороны, без энергии нельзя обеспечить потребителей высоким качеством жизни, а с другой – это может привести к невосполнимому ущербу окружающей среды. Поэтому, где есть предпосылки для замены традиционных выработок электрической и тепловой энергии следует внедрять альтернативные источники энергии [1–5].

Для получения электрической энергии из нетрадиционных и возобновляемых источников, возможно, использовать: солнечную энергию с помощью фотоэлектрических установок; энергию ветра с помощью ветроэнергетических установок; энергию биомассы с помощью биогазовых установок; энергию малых рек с помощью малых и гирляндных ГЭС; геотермальную энергию с помощью геотермальной станции. В Российской Федерации программа «Экологически чистая энергетика» предусматривает развитие систем солнечного отопления и горячего водоснабжения (ГВС) для индивидуальных жилых домов, сельскохозяйственных и производственных объектов. Общая потребность РФ в солнечных коллекторах оценивается миллионами квадратных метров, а 1 м² коллектора обеспечивает замещение до 0,15 т у. т. в год. Мощность потока солнечной энергии у верхней границы атмосферы составляет $1,7 \cdot 10^{14}$ кВт, а на поверхности Земли – $1,2 \cdot 10^{14}$ кВт. Общее годовое количество, поступающей на Землю солнечной энергии, составляет $1,05 \cdot 10^{18}$ кВт · ч, в том числе на поверхность суши приходится $2 \cdot 10^{17}$ кВт · ч [6]. Без последствий для экологического состояния окружающей среды может быть использовано до 1,5 % от всей поступающей солнечной энергии, что при высокоэффективном ее использовании позволит покрыть возрастающие потребности. Среднесуточная интенсивность потока солнечного излучения в тропических зонах и пустынях равна 210...250 Вт/м² (18...21,2 МДж/(м² · сут)), в центральной части России – 130...210 Вт/м² (10,8...18 МДж/(м² · сут)), а на севере России – 80...130 Вт/м² (7,2...10,8 МДж/(м² · сут)) [7]. Эти факты указывают на одно, что южные части РФ вполне могут использовать солнечную энергию для частичного покрытия потребности.

Цель работы.

Целью данной работы является анализ возможности использования солнечной энергии в системах теплоснабжения как альтернативу получения электрической и тепловой энергии.

Методы исследования.

Использован метод теоретического и аналитического анализа одного из доступных видов возобновляемой энергии, использование которой для теплоснабжения характерно для районов с теплым климатом, достаточным числом безоблачных дней и значительным поступлением солнечной радиации.

Как правило, мощность солнечных элементов небольшая и составляет около 0,7...0,75 Вт. Для получения большей мощности СЭ необходимо объединяться последовательно, образуя собой солнечные модули (СМ), которые могут собираться в солнечную батарею (СБ). Необходимо учитывать, что при последовательном соединении элементов присутствуют потери мощности. Коэффициент $\eta_{\Delta\mathcal{E}}$, учитывающий эти потери, составляет 0,95...0,99. Коэффициент, определяющий потери энергии при передаче ее к потребителю (потери в инверторе, зарядном устройстве и др.), составляет $\eta_{\Delta\mathcal{E}} = 0,9$.

КПД преобразования солнечных лучей в электрическую энергию напрямую зависит от того, из какого материала состоит солнечный элемент, его многослойности и температурных показаний окружающей среды. Для однослойных кремниевых монокристаллических солнечных элементов η_k составляет 10...15 %, для поликристаллических солнечных элементов $\eta_k = 8...12$ %, для аморфного кремния $\eta_k = 6...8$ %.

Рассмотрим целесообразность использования СМ для получения электрической энергии в условиях Краснодарского края [8], где число дней с облачной (пасмурной) погодой в летний период составляет от 0 до 1 дня (расчетный месяц – июль со среднемесячной температурой наружного воздуха $t = + 24,9$ °C).

На основе характеристик солнечной батареи типа ED-264FL (мощность модуля: $P = 264$ Вт; габариты модуля $5212 \times 914 \times 1,5$ мм; площадь модуля $4,76$ м²; габариты одного солнечного элемента 200×200 мм; количество солнечных элементов в модуле $n = 119$), определим выработку электроэнергии солнечной батареей, расположенной под углом $\beta = 69^\circ$ к горизонту в летний период времени, для семи жилых домов при расчетном потреблении электроэнергии одним домом за год – 6000 кВт · ч. Для чего рассчитывается необходимое количество модулей солнечных батарей и общая площадь, занимаемая ими, для обеспечения электроэнергией потребителей.

Площадь солнечного модуля рассчитывается по формуле

$$F_{\text{СМ}} = F_{\text{СЭ}} \cdot n \cdot K_{\text{зап}} , \quad (1)$$

где $F_{\text{сэ}}$ – площадь одного солнечного элемента, $F_{\text{сэ}} = 0,04$; $K_{\text{зап}}$ – коэффициент заполнения солнечными элементами площади солнечного модуля, $K_{\text{зап}} = 0,97$.

$$F_{\text{см}} = 0,04 \cdot 119 \cdot 0,97 = 4,62 \text{ м}^2.$$

Полезная мощность рассчитывается по формуле

$$P_{\text{пол}} = R \cdot F_{\text{см}}, \quad (2)$$

где R – уровень освещенности, Вт/м², определяется согласно [9].

$$P_{\text{пол}} = 759 \cdot 4,62 = 3506 \text{ Вт}.$$

КПД одного солнечного модуля:

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{пол}}}. \quad (3)$$

$$\text{Тогда, } \eta = \frac{264}{3506} = 0,075.$$

Выработка электрической энергии солнечной батареи в июле одним модулем рассчитывается по формуле

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{вал}} \cdot F_{\text{см}} \cdot m \cdot \eta \cdot K_t \cdot \eta_{\text{пэ1}} \cdot \eta_{\text{пэ2}}, \quad (4)$$

где $\mathcal{E}_{\text{вал}}$ – валовый удельный приход солнечной радиации на рассматриваемую площадь, кВт · ч/м²; K_t – коэффициент, учитывающий температуру, $K_t = 1,37$; $\eta_{\text{пэ1}}$ – потери мощности, определяемые последовательным соединением элементов, принимаются равными 0,96; $\eta_{\text{пэ2}}$ – потери мощности, определяемые передачей энергии до потребителя, принимаются равными 0,92.

$$\text{Тогда, } \mathcal{E} = 173,4 \cdot 4,62 \cdot 1 \cdot 0,075 \cdot 1,37 \cdot 0,96 \cdot 0,92 = 72,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Количество необходимых модулей для обеспечения электричеством в июле рассчитывается по формуле

$$m = \frac{\Pi}{\mathcal{E}} = \frac{22945,58}{72,7} = 316.$$

$$\text{Площадь, занимаемая модулями: } S = 4,76 \cdot 316 = 1504,16 \text{ м}^2.$$

Таким образом, для достижения выработки необходимого количества электрической энергии необходимо 316 модулей и территория 1504,16 м². И в тоже время, расчеты для аналогичных объектов Ленинградской области, показывают, что количество модулей около 29000, а площадь территории для размещения модулей составит около 138 000 м², что не является выгодным именно с экономической точки зрения.

Результаты исследования.

В ходе исследования и расчетов выбор солнечной энергии как возобновляемого источника энергии принят нецелесообразным с экономической точки зрения для Ленинградской области вследствие того, что продолжительность солнечного сияния менее 1700 часов в год, и территория находится на 56° северной широты (угол солнечного падения составит 34°), что не является оптимальными условиями для получения достаточного количества энергии.

Важным фактором, определяющим экономическую эффективность применения солнечного теплоснабжения для сооружений, является продолжительность их использования в течение года. Проблема заключается в том, что для высокоширотных районов различие в поступлении радиации летом и зимой может быть достаточно велико. В средней полосе России поступление энергии солнечного излучения в теплый период в пять раз больше, чем в холодный. Очевидно, что для данных метеоусловий солнечные установки должны иметь большую поверхность коллекторов для улавливания менее интенсивных потоков радиации, незамерзающий теплоноситель и, следовательно, дополнительные теплообменники для последующего нагревания воды и аккумуляторы, позволяющие сохранять тепло на длительный период времени.

Солнечное теплоснабжение (СТС) как направление использования солнечной энергетики (СЭ) является в той или иной степени освоенным. В основе таких систем лежит использование устройств, преобразующих солнечную радиацию в теплоту. Главным элементом таких устройств является солнечный коллектор (СК), поглощающий солнечные лучи с преобразованием их в тепловую энергию.

Установки СТС используются для горячего водоснабжения, отопления и кондиционирования воздуха в жилых, общественных зданиях, подогрева воды в плавательных бассейнах и в различных процессах промышленного и сельскохозяйственного производства.

Заключение.

В настоящее время в народном хозяйстве достаточно часто используется солнечная энергия – гелиотехнические установки (различные типы солнечных теплиц, парников, опреснителей, водонагревателей, сушилок). Солнечные лучи, собранные в фокусе вогнутого зеркала, плавят самые тугоплавкие металлы. Ведутся работы по созданию солнечных электростанций, по использованию солнечной энергии для отопления домов и т.д. Практическое применение находят солнечные полупроводниковые батареи, позволяющие непосредственно превращать солнечную энергию в электрическую.

Научный и практический интерес представляет возможность наряду с выработкой электроэнергии для электроснабжения целесообразность использования солнечной энергии в системах отопления и горячего водоснабжения.

Опыт эксплуатации этих установок показывает следующее [7]:

1) в системах солнечного горячего водоснабжения (СГВС) замещается около 40...60 % годового расхода топлива в зависимости от района расположения установок;

2) в системах солнечного отопления и СГВС замещается 20...50 % топлива;

3) «пассивные» системы отопления зданий позволяют снижать энергопотребление домов до 40 %, а в отдельных случаях – до 70 %.

В настоящее время в мире работает более 2 млн. СГВС и 250 тыс. систем солнечного отопления (ССО). Годовая производительность СГВС с температурой воды 30...40 °С оценивается в 300...650 кВт · ч/м². Для получения 200...300 л/день такой воды необходима общая площадь коллектора 5...8 м². Производительность отопительных установок с температурой 35...70 °С составляет 150...300 кВт · ч/м².

В ряде городов РФ эксплуатируются солнечно-топливные котельные. Солнечные приставки могут выполняться ко всем котельным, работающим по открытой схеме (то есть на нужды горячего водоснабжения) при наличии территории для размещения СК.

Помимо небольших солнечных систем теплоснабжения, рассчитанных на односемейный дом, все большее распространение получают системы, способные удовлетворить потребности многоквартирного дома или даже жилого района.

Несмотря на разнообразные способы применения солнечной энергии, нетрадиционное теплоснабжение объектов различного назначения осуществляется крайне редко. Ограниченность использования солнечной

энергии на территории РФ только южными областями является препятствием для широкого распространения установок в центральные и северные регионы. К основным причинам такого положения данных систем относятся отсутствие высокоэффективных и высокопроизводительных конструкций основного оборудования для нестабильных погодных условий и типовых решений для различных климатических зон РФ.

Для решения одной из главных проблем энергетики – истощение топливных ресурсов и предотвращение экологической катастрофы – возможно, решить за счет глобального использования различных альтернативных источников энергии, но, к сожалению, пока частично.

К экологически чистому источнику энергии относится Солнце. В настоящее время используется лишь ничтожная часть солнечной энергии. На это есть ряд причин – используемые солнечные батареи имеют сравнительно низкий КПД и пока очень дороги в производстве. Однако необходимо рассматривать их в качестве источника, частично покрывающего потребности в энергии.

Для оценки эффективности использования солнечного излучения конструкторы и потенциальные потребители нуждаются в информации о сезонных ресурсах его поступления в различных регионах России.

Библиографический список

1. *Костюшина К.И., Иванова И.В.* Альтернативные источники энергии и возможность их применения в городе Санкт-Петербурге // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2022 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2023. – 355 с. – С. 110-116.

2. *Иванова И.В., Куликов А.А., Дюкова И.Н.* Перспективы развития теплоснабжения с применением тепловых насосов в лесной комплексе// Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2023 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2024. – 433 с. – С. 165-174.

3. *Павловцев А.В., Иванова И.В.* Геотермальная энергия как один из перспективных альтернативных источников энергии // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических

машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2020. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2021. – С. 229-235.

4. *Снежков В.А., Иванова И.В.* Общие вопросы водородной энергетики // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2020. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2021. – С. 240-250.

5. *Бандель А.Л., Иванова И.В.* Энергосбережение и энергоэффективность в Российской Федерации // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2019 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2020. – С. 193-198.

6. *Валов М.И., Казанджан Б.И.* Системы солнечного теплоснабжения. – Москва: Изд-во МЭИ, 1991. – 137 с.

7. *Бобров А.В., Тремясов В.А.* Возобновляемые источники энергии: учеб.-метод. пособие. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 215 с.

8. *Бекман У., Клейн С., Даффи Дж.* Расчет систем солнечного теплоснабжения; пер с англ Г.А. Гухман, С.И. Смирнова. – Москва: Энергоиздат, 1982. – 79 с.

9. Свод правил: Строительная климатология: СП 131.13330.2025 – Взамен СНиП 23-01-99; введ. 1.01.2025 – Москва: Росстандарт, 2025. – 245 с.

Сведения об авторах

ФИО	Иванова Ирена Викторовна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	9424-7866
e-mail	irenalta@mail.ru

Аннотация

Выявлено, что для выработки электроэнергии и тепловой энергии целесообразно использовать в качестве или основного, или дополнительного источника энергии – энергию Солнца. На сегодняшний

день солнечные батареи относятся к дорогостоящему оборудованию, однако со временем потребитель будет получать дешёвую энергию. Важно, что солнечные батареи – это экологически чистый источник энергии, но для нашей страны не может полностью заместить классические способы получения энергии.

Ключевые слова: альтернативные источники энергии, электроэнергия, тепловая энергия; Солнце; солнечное теплоснабжение; солнечная батарея.

УДК: 620.92

Раздел рубрикатора ГРНТИ: 44.37.01

СОХРАНЕНИЕ МОЩНОСТИ ДИЗЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПРИ ПЕРЕВОДЕ НА ГЕНЕРАТОРНЫЙ ГАЗ ИЗ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ

Иванова И.В.

Введение.

Среди ряда стремительно развивающихся технологий по производству биотоплива из отходов растительного происхождения незаслуженно оказались не востребованной термическая переработка этих отходов в газообразное топливо.

Однако, в ряде ситуаций генераторный газ, может быть, с успехом использован в качестве источника тепловой или электрической энергии [1 – 6]. Например, стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, произведенной на дизельной электростанции, переведенной на генераторный газ из отходов деревоперерабатывающего предприятия в несколько раз дешевле 1 кВт·ч из районных энергосетей. Газодизельная электростанция окупается за 8...10 месяцев работы, позволяет утилизировать отходы и исключить затраты на их вывозку в отвалы.

Цель работы.

Целью данной работы является проработка технических решений для использования генераторного газа в дизельной электростанции.

Методы исследования.

Использован метод теоретического и аналитического анализа параметров, влияющих на технические характеристики дизельной электростанции.

Причиной безразличного отношения к использованию генераторного газа является его низкая теплота сгорания, которая приводит к падению мощности, например, дизельного двигателя.

Действительно, если взять в качестве примера усредненный элементный состав генераторного газа из низкосортных и влажных древесных отходов (CO = 23,6 %, H₂ = 14,9 %, CH₄ = 3,4 %, CO₂ = 8,0 %, O₂ = 0,6 %, N₂ = 49,5 %, W_t^r = 45...55 %), то теплота сгорания этого газа составит:

$$Q_i^{\Gamma\Gamma} = 108H_2 + 127,49CO + 356,5CH_4, \text{ кДж/нм}^3. \quad (1)$$

В результате имеем: $Q_i^{\Gamma\Gamma} = 108 \cdot 14,9 + 127,49 \cdot 23,6 + 356,5 \cdot 3,4 = 5830$ кДж/нм³.

Отношение теплоты сгорания генераторного газа $Q_i^{\Gamma\Gamma}$ к теплоте сгорания дизельного топлива $Q_i^{\Delta\Gamma}$ будет равна [7]: $\frac{Q_i^{\Gamma\Gamma}}{Q_i^{\Delta\Gamma}} = \frac{5830}{42500} = 0,138$.

Вместе с тем известно, что для полного сгорания 1 кг дизельного топлива требуется 11,17 нм³ воздуха. Для сжигания 1 кг генераторного газа (при плотности генераторного газа $\rho^{\Gamma\Gamma} = 1,1$ кг/нм³) достаточно 1,2 нм³ воздуха.

Теплота сгорания газозоудушной смеси при $\alpha = 1$ будет равна:

$$Q_g^{\Gamma\Gamma} = \frac{Q_i^{\Gamma\Gamma}}{1 + \alpha \cdot L_o}, \text{ кДж/нм}^3, \quad (2)$$

где L_o – теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 кг генераторного газа, $L_o = 1,2$ нм³/кг.

Следовательно, $Q_g^{\Gamma\Gamma} = \frac{5830}{2,2} = 2650$ кДж/нм³.

Теплота сгорания дизельно-воздушной смеси равна

$$Q_g^{\Delta\Gamma} = \frac{Q_i^{\Delta\Gamma}}{1 + \alpha \cdot L_o}, \text{ кДж/нм}^3, \quad (3)$$

где L_o – теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 кг дизельного топлива, $L_o = 11,17 \text{ нм}^3/\text{кг}$.

$$Q_g^{\text{дв}} = \frac{4250}{1 \cdot 11,17} = 3805 \text{ кДж/нм}^3.$$

Отношение теплоты сгорания газозоудушной смеси к теплоте сгорания дизельно-воздушной смеси будет равно: $\frac{Q_g^{\text{гв}}}{Q_g^{\text{дв}}} = \frac{2650}{3805} = 0,696$.

Тепловой потенциал заряда газозоудушной смеси значительно приближается к тепловому потенциалу дизельно-воздушной смеси, но все-таки остается намного меньше последнего. Это отставание и определяет падение мощности двигателя на 30 % и более от номинальной мощности.

В литературе [7,8] предлагают два направления для сохранения мощности двигателя при переводе его на генераторный газ. Первое направление предполагает мероприятия, направленные на повышение теплоты сгорания генераторного газа $Q_i^{\text{гг}}$, второе сводится к увеличению массы заряда газозоудушной смеси в цилиндре двигателя. Масса заряда рабочей смеси определяет работу цилиндра и входит в число важнейших параметров цикла. Однако качество заполнения цилиндра оценивается не абсолютным количеством свежего заряда, а относительной величиной отношения массы действительного заряда рабочей смеси G_d к массе теоретического заряда G_o внесенного в цилиндр при определенных идеальных условиях (процесс равновесный, скорость поршня предельно мала, идеальная теплоизоляция цилиндра и т. д.). Это отношение называется коэффициентом наполнения η_v . Так как масса действительного заряда всегда меньше массы теоретического заряда, то коэффициент наполнения меньше единицы. Однако при определенных условиях значение коэффициента η_v может быть и больше единицы. Его влияние на эффективную мощность двигателя видно из уравнения:

$$N_e = k \cdot n \cdot \eta_v \cdot \eta_e \cdot Q_g, \quad (4)$$

где η_v – коэффициент наполнения; Q_g – теплота сгорания рабочей смеси.

Из уравнения (4) следует, что восстановление мощности двигателя за счет увеличения массы действительного заряда рабочей смеси в определенной степени связано с увеличением коэффициента наполнения η_v и повышением теплоты сгорания заряда смеси Q_g .

Воспользовавшись уравнениями состояния для действительного и теоретического зарядов рабочей смеси коэффициент наполнения цилиндра

двигателя можно выразить через отношение давления P_a в начале процесса сжатия цикла и давления смеси P_k перед впускным трактом двигателя:

$$\eta_V = \frac{P_a}{P_k}. \quad (5)$$

Анализ выражения (5) показывает, что увеличить коэффициент наполнения возможно при повышении давления P_k , что обеспечивается системой наддува двигателя.

Заключение.

Анализ работы двигателя с наддувом [7,8] показывает, что с увеличением давления наддува P_k давление P_a в точке начала процесса сжатия цикла растет быстрее, и коэффициент наполнения увеличивается и может достигнуть значения больше единицы, что положительно сказывается на увеличении мощности двигателя.

Мощность двигателя при наддуве растет благодаря увеличению массы действительного заряда рабочей смеси.

Работа двигателей на генераторном газе с наддувом, по мнению автора, [7, 8] дает возможность увеличить мощность двигателя до 70 %. Из этого следует, что, используя наддув как способ повышения массы заряда газовой смеси можно получить такую же мощность, как и у двигателей, работающих на дизельном топливе.

В заключении следует отметить, что генераторная установка стационарной газодизельной электростанции работает под избыточным давлением, что снижает гидравлическое сопротивление газового тракта до турбокомпрессора и способствует эффективной работе системы наддува в целом.

Из рассмотренных технических решений следует, что падения мощности двигателя при переводе на генераторный газ можно избежать путем наддува рабочей смеси в цилиндр двигателя. Эффективной работе системе наддува способствует и тот факт, что стационарный газогенератор дизельной электростанции работает под избыточным давлением, что снижает гидравлическое сопротивление впускного тракта и требуемую мощность турбокомпрессора.

Библиографический список

1. *Иванова И.В., Ходорыч Н.Д., Иванов М.М.* Анализ результатов исследования вопросов техники использования генераторных газов в энергетике // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2019 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2020. – С. 157-164.
2. *Иванова И.В., Куликов А.А., Петров В.А.* Обоснование целесообразности получения и использования генераторного газа из древесных и других горючих газов // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2019 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2020. – С. 171-178.
3. *Иванова И.В., Куликов А.А., Иванов М.М., Прохоров В.А.* Анализ методов термической переработки биомассы в газогенераторных установках // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2020 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2021. – С. 171-179.
4. *Иванова И.В., Иванов Н.М.* Интенсификация процессов газификации // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2021 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2022. – С. 204-212.
5. *Иванова И.В.* Выбор схемы газификации древесных отходов // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2023 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2024. – С. 153-159.
6. *Иванова И.В., Русскова И.Г.* Анализ перспектив использования древесных отходов как топливного сырья // Технологии переработки отходов с получением новой продукции: материалы VI всероссийской научно-практической конференции. – Киров: Вятский государственный университет, 2024. – С. 7-9.
7. *Черномордик Б.М.* Теория и расчет транспортных газогенераторов. – Москва: Машгиз, 1943. – 176 с.
8. *Вырубов Д.Н.* Теория поршневых и комбинированных двигателей. – Москва: Машиздат, 1983. – 373 с.

Сведения об авторах

ФИО	Иванова Ирена Викторовна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	9424-7866
e-mail	irenalta@mail.ru

Аннотация

Определено, что в ряде случаев генераторный газ может быть использован в качестве источника тепловой или электрической энергии. Однако использование его на дизельных электростанциях приводит к падению мощности двигателя, что можно избежать путем наддува рабочей смеси в цилиндр двигателя. Используя наддув, как способ повышения массы заряда газозооушной смеси, можно получить такую же мощность, как и у двигателей, работающих на дизельном топливе.

Ключевые слова: дизельное топливо; древесные отходы; генераторный газ; дизельные электростанции.

УДК: 621.311.236

Раздел рубрикатора ГРНТИ: 44.29.29

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВОГО НАСОСА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ВЫТЯЖНОГО ВОЗДУХА ЛЕСОСУШИЛЬНОЙ КАМЕРЫ

Науман А. И., Кокорева С. В.

Введение.

Сушка пиломатериалов является наиболее энергоёмким этапом лесопильного производства, на долю тепловой энергии в себестоимости которого приходится до 30 %. Основные потери тепла (40–60 %) связаны с удалением отработанного влажного воздуха, имеющего после выхода из камеры температуру 35–50 °С и относительную влажность 80–95 %, что

указывает на значительный скрытый тепловой потенциал, обычно безвозвратно теряемый. В условиях ужесточения требований к энергоэффективности и необходимости снижения углеродного следа актуальным становится применение тепловых насосов для рекуперации этого низкопотенциального тепла, особенно в регионах с продолжительным отопительным периодом, где предварительный подогрев приточного воздуха даёт максимальный экономический эффект.

Несмотря на широкое распространение теплонасосных технологий в коммунальной энергетике и промышленности, их адаптация к специфике лесосушильного производства остается недостаточно изученной. Отсутствуют систематизированные данные о реальной энергетической эффективности таких систем применительно к нестационарным режимам работы сушильных камер, что затрудняет принятие обоснованных инвестиционных решений. В данной работе на примере действующего лесопильного цеха проведена оценка целесообразности интеграции парокомпрессионного теплового насоса в систему вентиляции сушильной камеры для утилизации тепла вытяжного воздуха и предварительного подогрева приточного воздуха.

Цель работы – определить энергетическую и экономическую эффективность применения парокомпрессионного теплового насоса для утилизации низкопотенциального тепла вытяжного воздуха лесосушильной камеры при предварительном подогреве приточного воздуха. Для достижения цели решались следующие задачи:

1. выполнить анализ режимов работы лесосушильной камеры и установить количественные характеристики вытяжного воздуха (температуру, относительную влажность, расход) на различных этапах сушки;
2. обосновать принципиальную схему интеграции теплового насоса в систему вентиляции камеры с размещением испарителя в вытяжном канале и конденсатора — в приточном;
3. рассчитать тепловую мощность рекуперации и коэффициент преобразования (COP) установки для характерных климатических условий региона;
4. оценить годовую экономию топливно-энергетических ресурсов и срок окупаемости дополнительных капитальных вложений.

Методы исследования.

В работе использован комплексный экспериментально-расчётный подход, позволивший оценить энергетическую эффективность применения теплового насоса для утилизации тепла вытяжного воздуха лесосушильной камеры. Исследование базировалось на натурных измерениях параметров

микроклимата в действующей камере периодического действия (тип «ЦНИИМОД-49», загрузка 50 м³ сосновых пиломатериалов) [1]. Измерения температуры, относительной влажности и скорости воздуха выполнялись на всех этапах сушки с использованием поверенных приборов в соответствии с требованиями [2].

Обработка данных проводилась методами теплового и термодинамического анализа с применением i–di–d диаграммы влажного воздуха для определения энтальпии и теплового потенциала вытяжного воздуха [3,4]. Расчёт тепловой мощности рекуперации и коэффициента преобразования (COP) выполнен на основе характеристик серийного парокомпрессионного теплового насоса (хладагент R134a) с учётом климатических данных региона (Северо-Запад, отопительный период 230 суток) [4,5].

Технико-экономическая оценка включала расчёт годовой экономии топлива, затрат на электроэнергию и срока окупаемости капитальных вложений [6]. Достоверность результатов обеспечена использованием поверенного измерительного оборудования, достаточным объёмом экспериментальных данных и корректностью применяемых математических моделей.

Результаты исследования.

В ходе выполнения натурных измерений на лесосушильной камере периодического действия (тип «ЦНИИМОД-49», загрузка 50 м³ сосновых пиломатериалов) установлены количественные характеристики вытяжного воздуха на различных этапах сушки. Температура воздуха варьировалась от 38 °С на этапе прогрева до 50 °С в фазе падающей скорости сушки, относительная влажность составляла 75–92 %, а энтальпия достигала 170 кДж/кг. Расход воздуха через вытяжной канал оставался постоянным (1,8 кг/с) на всех этапах, что обусловлено работой вентиляторной установки в фиксированном режиме.

Систематизация количественных характеристик вытяжного воздуха на различных этапах сушки представлена в табл. 1.

Табл. 1. Параметры вытяжного воздуха на этапах сушки

Этап сушки	Температура, °С	Относительная влажность, %	Энтальпия, кДж/кг	Расход воздуха, кг/с
Прогрев	38 ± 2	92 ± 3	145 ± 5	1,8
Постоянная скорость сушки	45 ± 2	85 ± 3	165 ± 6	1,8
Падающая скорость сушки	50 ± 2	75 ± 4	170 ± 7	1,8
Кондиционирование	42 ± 2	88 ± 3	155 ± 5	1,8

Полученные значения энтальпии и влагосодержания, рассчитанные с использованием $i - d$ диаграммы [2,3], подтверждают наличие значительного скрытого теплового потенциала в удаляемом воздухе. Максимальное количество тепла, которое может быть утилизировано при конденсации влаги, наблюдается на этапе постоянной и падающей скорости сушки, что определяет целесообразность размещения испарителя теплового насоса именно в эти периоды.

На основе климатических данных региона (Северо-Запад, отопительный период 230 суток) выполнен расчёт коэффициента преобразования (COP) для парокомпрессионного теплового насоса с хладагентом R134a [5,6]. Установлено, что при температуре конденсации 45 °С и температуре кипения, зависящей от параметров вытяжного воздуха, COP изменяется в диапазоне 2,2...4,1 в зависимости от температуры наружного воздуха. Наиболее высокие значения COP (3,8–4,1) достигаются при температурах выше 0 °С, когда разность между температурой кипения и конденсации минимальна. В холодный период (ниже –10 °С) COP снижается до 2,2–2,8, что, однако, не исключает эффективной работы установки благодаря стабильно высокой энтальпии вытяжного воздуха, поддерживающей испарение хладагента.

Расчет коэффициента преобразования (COP) для парокомпрессионного теплового насоса представлен в табл. 2.

Табл. 2. Коэффициент преобразования (COP) теплового насоса в зависимости от температуры наружного воздуха

Температура наружного воздуха, °С	Температура кипения хладагента, °С	Температура конденсации, °С	COP
–25 ... –20	–15 ... –10	45	2,2
–20 ... –10	–10 ... 0	45	2,8
–10 ... 0	0 ... 8	45	3,4
0 ... +5	8 ... 12	45	3,8
+5 ... +10	12 ... 15	45	4,1

Интегральная оценка за отопительный период показала, что суммарное тепло, утилизированное тепловым насосом, составляет 210 Гкал. Это позволило сократить потребление природного газа в котельной на 26,8 тыс. м³, что при действующем тарифе (8,5 руб./м³) соответствует снижению затрат на топливо на 228 тыс. руб./год. Дополнительные затраты электроэнергии на привод теплового насоса составили 98 тыс. руб./год (исходя из тарифа 6,2 руб./кВт·ч). Чистый годовой экономический эффект достиг 130 тыс. руб./год.

Капитальные затраты на приобретение и монтаж теплового насоса, включая вспомогательное оборудование и автоматику, составили 450 тыс. руб. Простой срок окупаемости, рассчитанный как отношение капитальных затрат к чистому годовому экономическому эффекту, равен 3,5 года. При этом общее снижение расхода тепла от котельной достигло 22 %, что подтверждает высокую энергетическую эффективность предложенного решения, что представлено в табл. 3.

Табл. 3. Техничко-экономические показатели внедрения теплового насоса

Показатель	Значение
Капитальные затраты, тыс. руб.	450
Чистый годовой экономический эффект, тыс. руб./год	130
Простой срок окупаемости, лет	3,5
Сокращение расхода тепла от котельной, %	22

Полученные результаты согласуются с данными, представленными в работах [4,6], где аналогичные системы рекуперации для лесосушильных камер показывают срок окупаемости в пределах 3–5 лет и снижение

энергопотребления на 20–25 %. Достоверность выводов обеспечена применением поверенного измерительного оборудования [1] и корректностью используемых теплофизических моделей [2,5].

Заключение.

Проведённое исследование позволило количественно оценить эффективность применения теплового насоса для утилизации тепла вытяжного воздуха лесосушильной камеры. Натурными измерениями установлено, что вытяжной воздух на этапах сушки имеет температуру до 50 °С, относительную влажность до 92 % и энтальпию до 170 кДж/кг, что подтверждает наличие значительного скрытого теплового потенциала. Коэффициент преобразования (COP) теплового насоса изменяется в диапазоне 2,2–4,1 в зависимости от температуры наружного воздуха, обеспечивая устойчивую работу в течение всего отопительного периода.

Интеграция теплового насоса позволяет утилизировать 210 Гкал тепла за отопительный сезон, сокращая расход природного газа на 26,8 тыс. м³ в год. Чистый годовой экономический эффект составляет 130 тыс. руб., срок окупаемости капитальных затрат (450 тыс. руб.) – 3,5 года, а снижение расхода тепла от котельной достигает 22 %.

Дальнейшее развитие направления связано с применением тепловых насосов с адаптивным управлением, комбинированием с системами аккумулирования тепла и интеграцией в единые энергетические комплексы предприятий. Использование теплонасосной рекуперации является эффективным инструментом повышения энергоэффективности лесопильного производства, позволяющим снизить потребление органического топлива и повысить экономическую устойчивость предприятия.

Библиографический список

1. *Стерлин Д.М.* Сушка древесины. – Москва: Лесная промышленность, 1990. – 224 с.
2. ГОСТ 16588-91 (ИСО 4470-81) Пиломатериалы и заготовки. Методы определения влажности. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 1992. – 8 с.
3. *Лыков А.В.* Теория сушки. – Москва: Энергия, 1968. – 472 с.
4. *Куликов В.А., Шишов В.П.* Сушка древесины. – Архангельск: АГТУ, 2002. – 184 с.
5. *Соколов Е.Я.* Теплофикация и тепловые сети. – Москва: Издательство МЭИ, 2009. – 472 с.

6. *Иванов А.А., Смирнов П.В.* Энергосбережение при камерной сушке пиломатериалов с использованием тепловых насосов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2023. – № 4. – С. 112–124.

Сведения об авторах

ФИО	Науман Анита Ивановна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	anita.naumanr@bk.ru

ФИО	Кокорева Софья Валерьевна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	sofi.kokoreva1313@gmail.com

Аннотация

В статье рассмотрена возможность повышения энергоэффективности лесосушильного производства за счёт утилизации низкопотенциального тепла вытяжного воздуха с применением парокомпрессионного теплового насоса. Цель работы – определение энергетической и экономической эффективности интеграции теплового насоса в систему вентиляции сушильной камеры для предварительного подогрева приточного воздуха. Исследование базировалось на натурных измерениях параметров микроклимата в действующей камере периодического действия (тип «ЦНИИМОД-49», загрузка 50 м³ сосновых пиломатериалов). Обработка данных выполнена методами теплового и термодинамического анализа с использованием *i–d*–*d* диаграммы влажного воздуха. Установлено, что

температура вытяжного воздуха на этапах сушки достигает 50 °С, относительная влажность – 92 %, энтальпия – 170 кДж/кг. Коэффициент преобразования (COP) теплового насоса изменяется в диапазоне 2,2–4,1 в зависимости от температуры наружного воздуха. Интеграция теплового насоса позволяет утилизировать 210 Гкал тепла за отопительный сезон, сокращая расход природного газа на 26,8 тыс. м³ в год. Чистый годовой экономический эффект составляет 130 тыс. руб., срок окупаемости капитальных затрат – 3,5 года, снижение расхода тепла от котельной – 22 %. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения теплонасосной рекуперации в лесосушильных камерах для повышения энергоэффективности и экономической устойчивости предприятий.

Ключевые слова: тепловой насос, лесосушильная камера, рекуперация тепла, энергоэффективность, коэффициент преобразования, сушка пиломатериалов, экономия топлива, срок окупаемости.

УДК 674.047:621.577

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.45.43

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ ЗОЛОТНИКОВОГО ТИПА

Байлов К.А., Садыков Р.Ф., Кривоногова А.С., Пушков Ю.Л.

Введение.

Несмотря на то, что гидравлический привод является одним из важнейших элементов лесных машин, его диагностирование в настоящее время испытывает определённые трудности. Это связано со специфическими условиями эксплуатации и текущего ремонта, ограничивавшими возможность применения классических методов диагностики в лесной отрасли [1].

Цель работы – определение оптимальной периодичности обслуживания элементов гидравлических приводов лесных машин при использовании различных критериев оценки их технического состояния.

Методы и результаты исследования.

Золотниковые гидрораспределители (рис.1) используются при номинальных давлениях до 32 МПа. С их помощью осуществляется управление направлением движения рабочих органов гидродвигателей (валов гидромоторов и штоков гидроцилиндров) [2].

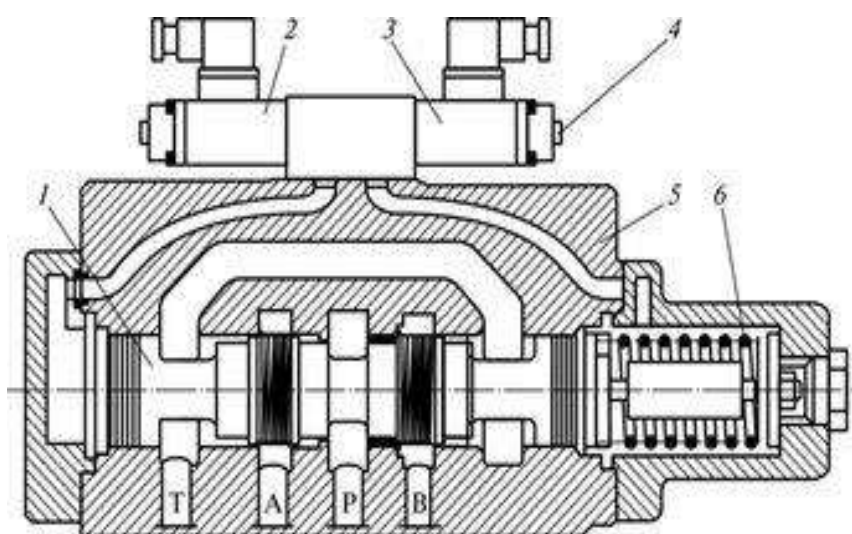


Рис. 1. Гидрораспределитель золотникового типа

Корпус (5) из высокопрочного чугуна или стали, внутри которого точно расточены сложная система каналов и полости. В корпусе предусмотрены основные порты для подключения гидролиний: входное отверстие (Р) для подачи жидкости от насоса, сливное отверстие (Т) для возврата масла в бак, а также два рабочих канала (А и В), которые соединяются с исполнительным механизмом, например, с полостями гидроцилиндра. **Золотник цилиндрической формы.** Представляет собой стержень (1) с рядом поясков и канавок, которые при его перемещении совмещаются с различными каналами в корпусе, открывая или перекрывая пути для потока жидкости [3]. **Механизм управления.** Это может быть простое ручное управление посредством рычага, непосредственно соединённого с золотником, или дистанционное или автоматическое управление с помощью электромагнитных приводов — соленоидов. В мощных гидравлических системах применяется пневматическое или гидравлическое пилотное управление, где для перемещения основного золотника используется давление вспомогательной жидкости или воздуха. **Возвратные пружины (6).** В распределителях с электромагнитным управлением обычно устанавливаются две пружины, расположенные по обе стороны от золотника. Когда на соленоид не подаётся управляющий сигнал, эти пружины возвращают золотник в строго фиксированное нейтральное положение, предотвращая несанкционированное движение рабочих органов.

При работе золотника в следящей системе требуется, чтобы его коэффициент усиления, который пропорционален ширине рабочего канала, не зависел от положения золотника или, другими словами, каналы должны быть прямоугольными [1]. С технологической точки зрения это требование не совсем удачное, так как выполнение прямоугольных отверстий обходится значительно дороже, чем сверление круглых. Тем не менее, поддержание постоянного коэффициента усиления важно потому, что практически все золотники имеют прямоугольные рабочие каналы. В некоторых случаях эти отверстия сверлятся в корпусе золотника, который служит одновременно корпусом и втулкой. Однако в большинстве случаев отверстия выполняются в отдельной втулке, которая затем вставляется в расточку корпуса. Сами отверстия могут быть выфрезерованы в стенке втулки снаружи, так что при пересечении этой поверхности с внутренней поверхностью втулки образуется прямоугольное отверстие [4].

Соединительные каналы в корпусе золотника, приводящие жидкость к рабочим каналам, должны быть достаточно большими, чтобы исключить явление «насыщения». Предположительное соотношение площадей их

поперечного сечения как 4:1 не слишком большое, с точки зрения установившегося значения перепада давлений и его следует по возможности увеличивать. В золотниках с большой выходной мощностью (в противоположность золотникам первого каскада гидроусилителя), в особенности при работе на пониженном давлении и с большими расходами, иногда бывает трудно обеспечить соотношение 4:1 в полостях между буртиками золотника и в самой втулке, в данном случае это соотношение следует увеличить, по крайней мере в каналах корпуса. С другой стороны, следует избегать чрезмерного увеличения объема соединительных трубопроводов, ведущих к гидромотору, так что лучше всего предварительно задать длину трубопроводов, а затем по возможности укоротить их [5]. Магистрали питания и слива могут иметь любые размеры.

Следует также отметить, что соединительные каналы должны быть прямыми и ровными, не имеющими пересечений и ответвлений, хотя это требование обычно очень трудно выполнить, дополнительными потерями давления в углах каналов можно пренебречь, но если канал извилистый и просверлен с применением заглушек в местах входа сверла, то в канале могут быть глухие ответвления, в которых задерживаются и остаются грязь и стружки, которые вместе с потоком масла затем попадают в механизм. Очень трудно добиться того, чтобы эти глухие каналы не засорились в процессе изготовления, или добиться очистки их после попадания загрязненного масла в золотнике гидрораспределителя [1, 6].

Следует уделять особое внимание заделке технологических отверстий, остающихся после сверления канала. Иногда для этой цели используют конические пробки, размер которых выбирается таким образом, что при их запрессовке в отверстие требуется большое давление, в результате чего наблюдается деформация материала корпуса. Однако практически такой метод заделывания отверстий опасен в случае, если пробка запрессовывается в отверстие достаточно глубоко и ее торец оказывается ниже поверхности корпуса, а края отверстия расклепываются.

По многих гидрораспределителях применяются каналы с конической резьбой, в которую можно ввернуть любую соединительную арматуру. Такой метод соединения имеет недостатки, так как почти неизбежно влечет за собой деформацию корпуса при ввинчивании арматуры [1, 7]. Если рабочий зазор между золотником и втулкой составляет 0,0025 мм, корпус золотника не должен испытывать сильной деформации, которая может привести к искривлению втулки и затиранию или заклиниванию золотника. Есть два средства борьбы с этим явлением:

- 1) использование арматуры с цилиндрической нарезкой и

2) сланцевых соединений. В обоих случаях герметизация обеспечивается уплотнительными кольцами.

Внедрение прогрессивных методов диагностирования гидравлических приводов машин при эксплуатации связано с решением вопросов оптимизации режимов их технического обслуживания и ремонта [8]. Важным условием эффективной эксплуатации гидропривода является сокращение суммарных затрат на содержание в исправном состоянии при обеспечении постоянной производительности машины. Возможна и другая постановка задачи, повышение производительности машины и сохранение при этом требуемого уровня затрат на ремонт и обслуживание гидропривода. В обоих случаях учитываются технические и экономические показатели гидропривода. Оптимизация этих показателей является важным резервом повышения эффективности процесса технического обслуживания и позволяет организовать оптимальное управление надежностью гидроприводов на стадии эксплуатации.

Целью оптимального управления является увеличение ресурса элементов гидропривода (в том числе и гидрораспределителя) благодаря минимизации изнашивания при регламентированных затратах на устранение отказов. Выбор оптимального управления обслуживанием может быть произведен на основе обобщения опыта эксплуатации гидроприводов или по результатам специальных экспериментальных исследований, но этот путь требует дополнительных затрат [1,3]. Поэтому в современной практике чаще используются аналитические методы, базирующиеся на математическом моделировании процесса технического обслуживания. При этом во многих случаях не требуется создание полной модели процесса технического обслуживания, в которой учитывались бы изменения физического состояния элементов гидропривода при эксплуатации и экономические показатели, а могут быть использованы упрощенные модели, предназначенные для решения конкретных практических задач. К таким задачам относится определение оптимальных значений предельных параметров износа элементов гидропривода, исходя из заданных времени наработки и производительности гидропривода при эксплуатации. Завышенные предельные значения износа пар трения обуславливают увеличение срока службы (ресурса) гидропривода, но при этом происходит снижение производительности машин вследствие увеличения утечек жидкости через зазоры в трущихся парах. Заниженные предельные значения износа трущихся поверхностей приводят к сокращению ресурсов гидроагрегатов, однако, обеспечивают высокую производительность машины в течении всего периода эксплуатации.

Необходимость оптимизации видна не только при расчете предельных значений параметров износа, но и при определении оптимальных режимов процесса технического обслуживания. Например, скорость изнашивания трущихся поверхностей можно снизить благодаря увеличению частоты обслуживания элементов гидропривода, что связано с дополнительными затратами средств, материалов и т.п. При этом увеличивается ресурс гидропривода и снижаются затраты на приобретение запасных гидроагрегатов или отдельных узлов гидропривода [1,5].

При определении оптимальной периодичности обслуживания гидравлических приводов машин могут использоваться различные критерии. Для гидрораспределителей, отказы которых не связаны с опасностью для людей, целесообразно использовать экономические критерии. Оптимальная периодичность технического обслуживания для гидрораспределителей (Π) в этом случае может быть определена из условия достижения максимального значения соотношения:

$$\Pi = \left\{ \frac{P(t)}{W_{\text{то}}} \right\}, \quad (1)$$

где $P(t)$ – требуемый уровень надежности работы гидрораспределителя между техническими обслуживаниями;

$W_{\text{то}}$ – трудовые затраты на техническое обслуживание, чел. час

При экспоненциальном распределении потока отказов оптимальная периодичность работ по техническому обслуживанию может быть определена как:

$$t_{\text{онм}} = \frac{\ln \lambda_1 - \ln \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}, \quad (2)$$

где λ_1 – интенсивность возникновения неисправностей;

λ_2 – интенсивность отказов.

На практике оптимальное значение периодичности проведения работ по техническому обслуживанию и контролю гидрораспределителя обычно находят путем построения зависимостей вероятности возникновения неисправности в системе P_n , вероятности возникновения отказа и вероятности безотказной работы гидрораспределителя при наличии неисправности $P_n(t)$ от времени t .

Заключение.

Полученные расчетные значения оптимальной периодичности работ по техническому обслуживанию и контролю гидрораспределителя следует рассматривать как желательные, которые необходимо учитывать при определении периодичности технического обслуживания машины в целом,

так как работы по обслуживанию системы гидропривода должны быть приурочены к определенному виду технического обслуживания машин [1,6].

Библиографический список

1. Клечков И.Р., Пушков Ю.Л., Кривоногова А.С. Оптимизация периодичности проведения работ по техническому обслуживанию и контролю гидрораспределителя лесных машин // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 628-630.

2. Пушков Ю.Л., Кривоногова А.С., Добрынин Ю.А., Садыков Р.Ф., Байлов К.А. Особенности рабочего процесса адиабатных двигателей и перспективы применения на лесотранспортных машинах // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2023 года. – Санкт-Петербург, 2024. – С. 280-289.

3. Добрынин Ю.А., Пушков Ю.Л., Кривоногова А.С. Организация диагностирования лесных машин // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 615-617.

4. Кривоногова А.С., Пушков Ю.Л. Новые принципы безразборной диагностики механизмов и систем двигателя // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 645-648.

5. Котлов Д.П., Кривоногова А.С., Пушков Ю.Л. Методика определения технического состояния узлов трения лесных машин // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 631-633.

6. Пушков Ю.Л. Оценка влияния конструктивных особенностей колесного трелевочного трактора и предмета труда на тормозные свойства трактора // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2005. – Вып. 175. – С. 101-115.

7. Добрынин Ю.А., Пушков Ю.Л., Кривоногова А.С. Методика диагностики гидравлических приводов лесных машин // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 612-614.

8. *Охапкин Т.А., Пушкив Ю.Л., Кривоногова А.С.* Оценка потенциальных свойств двигателя на эксплуатационную эффективность работы лесопромышленного трактора // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 654-657.

Сведения об авторах

ФИО	Байлов Константин Алексеевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	4916-5464
e-mail	kostya.baylov@yandex.ru
ФИО	Садыков Руслан Фарходович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	sadykovvv@mail.ru
ФИО	Кривоногова Александра Станиславовна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	8399-6121
e-mail	krivonogovaas@spbftu.ru
ФИО	Пушков Юрий Леонидович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	5633-1797
e-mail	pushkovyl@spbftu.ru

Аннотация

Затрагиваются вопросы эксплуатации элементов гидропривода технологического оборудования лесных машин, в частности гидрораспределителей золотникового типа, для определения оптимального значения периодичности проведения работ по техническому обслуживанию и контролю гидрораспределителя.

Ключевые слова: эксплуатация гидропривода, гидрораспределитель золотникового типа, значения износа пар трения, оптимальная периодичность технического обслуживания.

УДК 62-2:62-94+62-97/-98

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.17.15, 66.17.99

МЕТОДИКА ПРОВЕРКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕЙ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ С ПНЕВМАТИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ ЛЕСОВОЗНОГО ТЯГАЧА

Величко Т.Р., Лукин Е.А., Кривоногова А.С., Пушков Ю.Л.

Введение.

Для проверки технического состояния тормозной системы автомобилей предусмотрено два метода испытаний – дорожный и стендовый. Стендовые испытания проводят на стендах инерционного или силового типа в порожнем состоянии автомобиля [1].

Цель работы – усовершенствование методики проверки технического состояния рабочей тормозной системы лесовозного тягача, с учетом основных технических характеристик транспортного средства и условий эксплуатации.

Методы и результаты исследования.

Анализ методик испытаний автомобилей показывает, что при определенных условиях испытаний порожнего автомобиля роликовые стенды позволяют оценить техническое состояние рабочей тормозной системы [2]. Методика испытаний базируется на двух положениях:

Первое заключается в том, что испытание тормозных свойств порожнего автомобиля осуществляется при пониженном давлении воздуха в пневмосистеме P_d , которое меньше, чем указано в инструкции по эксплуатации автомобилей P_H . Второе положение основано на том, что

максимальное усилие, развиваемое тормозным механизмом усилие, определяется расчетным путем по результатам испытаний порожнего автомобиля на роликовом стенде с пониженным давлением воздуха в пневмосистеме:

$$F_k^{max} = \frac{P_{H-0.4}}{P_{d-0.4}}, \quad (1)$$

где 0,4 – величина давления воздуха, расходуемая на заполнение пневмосистемы в момент экстренного торможения, Н.

Рекомендуемое давление в пневмоприводе грузовых автомобилей при проверке их тормозных качеств на роликовых стендах по формуле:

$$P_H = 19,6 - 24,6 \text{ Н}. \quad (2)$$

Из этого следует, что проверка технического состояния тормозного механизма колеса осуществляется не в экстремальном, а в частичных режимах. Правомерность этого положения основана на линейности функций

$$F_T = f(p). \quad (3)$$

Для реализации этой методики необходимо знать предельные значения $F_{Tпр}$, $F_{Kпр}$ и P_d применительно к колесам лесовозного тягача.

Основным критерием при определении этих параметров являются тормозные свойства груженого автомобиля. В соответствии с требованиями отраслевого стандарта автомобильной промышленности, тормозная система новых автомобилей при экстренном торможении груженого автомобиля на асфальтобетонной дороге должна обеспечивать определенное значение установившегося замедления [3].

Для автомобилей, находящихся в эксплуатации, предельное значение $j_{пр} = 4 \text{ м/с}^2$. Этому параметру соответствует предельное значение общего удельного тормозного усилия, развиваемого в тормозном механизме, равное 0,41, т.к.

$$\gamma_\tau = \frac{j_{пр}}{q} = 0,4, \quad (4)$$

где q – ускорение силы тяжести м/с^2 .

Зная этот параметр, а также распределение веса автомобиля по осям можно определить предельное значение усилий в тормозном механизме колеса:

$$F_{Tпр} = \frac{j_{пр} \cdot Q}{q \cdot 2}, \quad (5)$$

где Q – вес тягача, Н

Значение Q для условий статики, когда автомобиль стоит неподвижно или испытывается на тормозном стенде и для условий динамики различны. В реальных условиях эксплуатации, в динамике, при торможении

автомобиля происходит перераспределение нагрузок на переднюю и заднюю оси автомобиля. При этом возникают силы инерции, которые действуя на плече от центра тяжести автомобиля до дороги, увеличивают нагрузку на переднюю ось и, наоборот, уменьшают нагрузку на заднюю ось автомобиля [1,4].

Значение нормальных реакций на переднюю Z_1 и заднюю Z_2 оси автомобиля во время торможения существенно отличается от значений нагрузки Q_1 и Q_2 в статическом состоянии автомобиля. По литературным данным в процессе торможения автомобиля на ровной дороге нагрузка на переднюю ось Q_1 возрастает в 1,5...2 раза, а на заднюю Q_2 уменьшается на 30...50%.

Значение нормальных реакций Z_1 и Z_2 зависят от распределения веса автомобиля по осям в статике и коэффициентов изменения реакций в динамике для передней m_1 и задней m_2 осей. Эти коэффициенты определяются конструктивными параметрами автомобиля – зависят от координат центра тяжести, т.е. от плеча центра тяжести $h_{ц}$, расстояние от центра тяжести до передней «а» и задней «b» осей и коэффициента сцепления.

$$Z_1 = m_1 \cdot Q_1 = \left(1 + \frac{\varphi \cdot h_{ц}}{b} \cdot Q_1\right), \quad (6)$$

$$Z_2 = m_2 \cdot Q_2 = \left(1 - \frac{\varphi \cdot h_{ц}}{b} \cdot Q_2\right), \quad (7)$$

Тогда предельные значения усилий, развиваемых в тормозных механизмах колес и обеспечивающих тормозные свойства автомобиля, при экстренном торможении в дороге с учетом предельного замедления будут иметь вид:

$$\sum F_{Тпр} = \frac{j_{пр}}{q} \left[\left(1 + \frac{j_{пр} \cdot h_{ц}}{q \cdot b}\right) \cdot Q_1 + \left(1 - \frac{j_{пр} \cdot h_{ц}}{q \cdot a}\right) \cdot Q_2 \right]. \quad (8)$$

Расчетным путем определено, что для обеспечения установившегося замедления 4 м/с² и тормозного пути 23 м при начальной скорости торможения 40 км/ч груженого автомобиля на ровной дороге с цементно-или асфальтобетонным покрытием, автомобили, находящиеся в эксплуатации, должны обеспечивать предельные значения $F_{Т1пр}=7$ кН, $F_{Т2пр}=15,1$ кН и $\sum F_{Тпр} = 61,7$ кН. Эти параметры груженого автомобиля существенно отличаются от порожнего автомобиля. У груженого автомобиля в сравнении с порожним, $F_{Т1пр}$, $F_{Т2пр}$ и $\sum F_{Тпр}$ больше соответственно на 14% в 2,3 раза и на 52%. Особенно большая разница наблюдается на задней оси [2,5].

Из этих данных следует, что по результатам дорожных испытаний порожнего автомобиля не представляется возможным правильно оценить техническое состояние тормозной системы и гарантировать ее надежную работу в случаях автомобиля с полной массой [6].

В эксплуатации могут иметь место случаи, когда порожний автомобиль, обеспечивающий в соответствии с требованиями тормозной путь $S_T = 18,4$ м и $j_{пр} = 5,7$ м/с² не обеспечит требуемых тормозных свойств в груженом состоянии.

Зная предельные значения усилий в тормозных механизмах и реализуемые на роликовых стендах максимальные тормозные силы из уравнения применительно к передним или задним колесам можно определить давление воздуха в пневмосистеме, при которых целесообразно диагностировать тормозную систему [1,7].

$$P_э = \frac{F_K^{max}}{F_{Tпр}} (P_H - 0,4) + 0,4. \quad (9)$$

Расчеты показывают, что при минимально допустимом давлении воздуха в пневмосистеме 66,6 Н и коэффициентах сцепления колеса с беговым роликом стенда 0,55 и 0,58 проверку технического состояния тормозов передних колес необходимо осуществлять при экспериментальных давлениях соответственно 42,1 и 44,1 Н, а задних колес при давлении 33,3 и 35,3 Н.

Предельные значения тормозных усилий в диапазоне этих давлений можно определить по уравнению:

$$F_{Tпр} = \frac{F_{Tпр} \cdot (P_э - 0,4)}{P_H - 0,4}. \quad (10)$$

Задаваясь различными значениями $P_э$ в указанных диапазонах давлений, можно составить таблицу или номограмму функций $F_{Tпр} = f(p)$, по которым оператор-диагност может оценивать предельные значения максимальных тормозных усилий.

Заключение:

Надежность тормозной системы и ее работоспособность оценивается по времени срабатывания и максимально развиваемой тормозной силе в системе колесо-дорога при максимальном давлении воздуха в пневмосистеме и экстренном торможении. Если блокировка колеса не наблюдается, т.е. колесо вращается вместе с беговыми роликами, то диагностирование прекращается и автомобиль направляется в ремонт [1,3-5]. Если колесо блокируется и время срабатывания не более 1 с, то диагностирование продолжается.

Библиографический список

1. *Добрынин Ю.А., Пушков Ю.Л., Кривоногова А.С.* Организация диагностирования лесных машин // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 615-617.
2. *Кривоногова А.С., Пушков Ю.Л.* Новые принципы безразборной диагностики механизмов и систем двигателя // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 645-648.
3. *Котлов Д.П., Кривоногова А.С., Пушков Ю.Л.* Методика определения технического состояния узлов трения лесных машин // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 631-633.
4. *Пушков Ю.Л., Кривоногова А.С., Добрынин Ю.А., Садыков Р.Ф., Байлов К.А.* Особенности рабочего процесса адиабатных двигателей и перспективы применения на лесотранспортных машинах // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2023 года. – Санкт-Петербург, 2024. – С. 280-289.
5. *Клечков И.Р., Пушков Ю.Л., Кривоногова А.С.* Оптимизация периодичности проведения работ по техническому обслуживанию и контролю гидрораспределителя лесных машин // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 628-630.
6. *Добрынин Ю.А., Пушков Ю.Л., Кривоногова А.С.* Методика диагностики гидравлических приводов лесных машин // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 612-614.
7. *Охапкин Т.А., Пушков Ю.Л., Кривоногова А.С.* Оценка потенциальных свойств двигателя на эксплуатационную эффективность работы лесопромышленного трактора // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 654-657.

Сведения об авторах

ФИО	Величко Тихон Романович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	t.velichko23@gmail.com
ФИО	Лукин Елисей Андреевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	eliseymen2016@gmail.com
ФИО	Кривоногова Александра Станиславовна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	8399-6121
e-mail	krivonogovaas@spbftu.ru
ФИО	Пушков Юрий Леонидович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	5633-1797
e-mail	pushkovyl@spbftu.ru

Аннотация

Предлагается методика определения надежности тормозной системы с пневматическим приводом лесовозного тягача на роликовых тормозных стендах, с учетом перераспределения нагрузок на оси автомобиля в процессе торможения.

Ключевые слова: Роликовый тормозной стенд, замедление, процесс торможения, основные показатели тормозных свойств автомобиля.

УДК 62-2:62-94+62-97/-98

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.17.15, 66.17.99

АНАЛИЗ КОМПОНЕНТ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННОГО МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА НА БАЗЕ ТРАКТОРА «КИРОВЕЦ»

Дурманов М.Я., Спиридонов С.В.

Введение.

Технико-экономические критерии (ТЭК) функционирования машинно-тракторного агрегата (МТА) – это система комплексных показателей качества проектирования трактора и агрегатируемых с ним механизмов для проведения полного спектра лесохозяйственных работ [1]. Метод оценки ТЭК, учитывающий энергозатраты на реализацию касательной силы тяги, позволяет оценивать на стадии проектирования МТА не только часовой расход топлива и масла на угар [2,3], но и эффективно используемую мощность и скорость объемного изнашивания пар трения дизеля [4].

В статье определяются компоненты энергозатрат на реализацию касательной силы тяги и часового расхода топлива для пахотного режима работы трактора «Кировец» К-744Р-05 с плугом ПУН-8-40 на тяжелых почвах.

Цель работы – разработка методов оценки и анализа компонент энергозатрат на реализацию касательной силы тяги и часового расхода топлива для различных режимов функционирования лесохозяйственного МТА. В пахотном режиме базовыми компонентами ТЭК являются

компоненты регулярной и динамической составляющей касательной силы - от инерционных сил МТА; от колебаний подвеса МТА в продольно-вертикальной плоскости; от динамики отброса пласта.

Методы исследования.

Для доказательства эффективности предлагаемых методов разработаны аналитические теоретико-экспериментальные модели функционирования МТА на базе сельскохозяйственного колесного трактора класса тяги 50 кН при динамических режимах нагружения. Аналитические модели представлены передаточными функциями [5]. Передаточная функция двигателя ЯМЗ-238НД5 получена экспериментально-опытным путем [6,7], а колебания подрессоренной массы МТА – теоретически [1].

Регулярная компонента касательной силы $F_{\hat{e}1}^i$, затрачиваемая на преодоление регулярных сил сопротивления движению МТА, определяется выражением [1,2]:

$$F_{\hat{e}1}^i = mg \cdot \sin \alpha + (f_{\hat{o}\hat{e}}m_{\hat{o}} + f_{\hat{o}\hat{n}}m_{\hat{i}\hat{e}})g \cos \alpha + \hat{e}_i ab + \left(\frac{\pi R}{30i_{\hat{o}}}\right)^2 \xi ab n_0^2; \quad (1)$$

где m – масса МТА, $m = m_{\hat{o}} + m_{\hat{i}\hat{e}}$; $m_{\hat{o}}$ – масса трактора; $f_{\hat{o}\hat{e}}$ – коэффициент трения качения; $m_{\hat{i}\hat{e}}$, $f_{\hat{o}\hat{n}}$ – масса плуга и коэффициент трения о дно и стенку борозды; α – угол подъема участка пути; $\hat{e}_i$ – удельное сопротивление почвы; a, b – глубина обработки почвы и ширина захвата плуга; g – ускорение свободного падения; n_0 – регулярная составляющая частоты вращения двигателя: $n_0 = 0.8n_1$; n_1 – номинальная частота вращения коленчатого вала дизеля; ω – частота колебания нагрузки; ξ, v_0 – коэффициент динамичности и регулярная скорость движения агрегата.

Переменная составляющая $F_{\hat{e}}^i(\omega, v_0)$ касательной силы тяги лесохозяйственного МТА в пахотном режиме определяется выражением [1,2]

$$F_k^{\pi}(\omega, v_0) = F_c^a [2RA_3\omega \cdot |U_{11}(j\omega, v_0)| + A_4\omega \cdot |U_{11}(j\omega, v_0)|] + f_{\text{тк}} |\Theta_v^{\pi}(j\omega, c_1)|, \quad (2)$$

где F_c^a – амплитуда переменной составляющей сил сопротивления движению МТА; R – радиус ведущего колеса; ω – частота колебания нагрузки; $f_{\hat{o}\hat{e}}$ – коэффициент трения качения; $|U_{11}(j\omega, v_1)|$ – передаточная функция частоты вращения энергосиловой установки МТА; $|\Theta_a^i(j\omega, \tilde{n}_1)|$ – передаточная функция колебаний остова МТА в продольно-вертикальной плоскости в пахотном режиме;

$$A_3 = \left(\frac{\pi R}{30i_0}\right)^2 \xi_{ab}; \quad A_4 = \frac{\pi R}{30i_0} m.$$

Результаты моделирования целесообразно представлять поверхностями состояния амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), касательной силы тяги МТА и часового расхода топлива, для варьируемых конструктивных параметров. Объем, ограниченный поверхностью состояния АЧХ касательной силы и осями координат, рассматривается как энергия, часть которой расходуется на реализацию регулярной касательной силы, а другая - как потери на динамическую составляющую касательной силы. Выполняя сечения поверхностей состояния АЧХ в продольно-вертикальной плоскости при любом фиксированном значении регулярной скорости движения МТА и по всему диапазону частот колебаний нагрузки на ведущих колесах вычисляются регулярная и динамическая составляющие касательной силы и часового расхода топлива [1,2].

По формуле (2) вычислены суммарные потери на динамику, а также компоненты динамической составляющей касательной силы в диапазоне частот $\omega = 0 \dots 20 \text{ с}^{-1}$ при скорости 2,01 м/с для различных значений жесткости подвеса МТА $c_1 = 1500, 1200, 900 \text{ кН/м}$ (табл. 1):

1 – от инерционных сил МТА

$$F_{k1}^n(\omega) = A_4 \frac{F_c^a R}{\omega_{сн}} \cdot \int_{\omega=0}^{\omega=20} \omega \cdot |U_{11}(j\omega)| d\omega; \quad (3)$$

2 – от колебаний подвеса МТА в продольно-вертикальной плоскости

$$F_{k2}^n(\omega) = \frac{f_{тк}}{\omega_{сн}} \cdot \int_{\omega=0}^{\omega=20} |\Theta_B^n(j\omega)| d\omega; \quad (4)$$

3 – от динамики отброса пласта

$$F_{k3}^n(\omega) = 2A_3 \frac{F_c^a R}{\omega_{сн}} \cdot \int_{\omega=0}^{\omega=20} \omega \cdot |U_{11}^2(j\omega)| d\omega; \quad (5)$$

– суммарная динамическая составляющая потерь в зависимости от жесткости c_1

$$F_k^n(\omega) = \frac{F_c^a}{\omega_{сн}} \cdot \int_{\omega=0}^{\omega=20} |G_{21}^n(j\omega)| d\omega, \quad (6)$$

где $G_{21}^n(j\omega)$ – передаточная функция касательной силы в пахотном режиме [1].

Потери энергии $\dot{Y}^i(\omega)$ в режиме пахоты тяжёлого грунта на реализацию динамической составляющей касательной силы $F_e^i(\omega)$, а также

ее компонентов в диапазоне частот $0...20 \text{ с}^{-1}$ при фиксированной регулярной скорости $v_o = 2,01 \text{ м/с}$ для различных значений жесткости подвеса МТА $c_1 = 1500, 1200, 900 \text{ кН/м}$ (табл. 1):

1 – от инерционных сил МТА

$$\mathcal{E}_1^{\Pi}(\omega) = A_4 \frac{F_c^a R}{\omega_{\text{сн}}} \cdot v_o \cdot \int_{\omega=0}^{\omega=20} \omega \cdot |U_{11}(j\omega)| d\omega; \quad (7)$$

2 – от колебаний подвеса МТА в продольно-вертикальной плоскости

$$\mathcal{E}_2^{\Pi}(\omega) = \frac{f_{\text{тк}}}{\omega_{\text{сн}}} \cdot v_o \cdot \int_{\omega=0}^{\omega=20} |\Theta_B^{\Pi}(j\omega)| d\omega; \quad (8)$$

3 – от динамики отброса пласта

$$\mathcal{E}_3^{\Pi}(\omega) = 2A_3 \frac{F_c^a R}{\omega_{\text{сн}}} \cdot v_o \cdot \int_{\omega=0}^{\omega=20} \omega \cdot |U_{11}^2(j\omega)| d\omega; \quad (9)$$

– суммарная величина потерь в зависимости от жесткости c_1 подвеса МТА

$$\mathcal{E}^{\Pi}(\omega) = \frac{F_c^a}{\omega_{\text{сн}}} \cdot v_o \cdot \int_{\omega=0}^{\omega=20} |G_{21}^{\Pi}(j\omega)| d\omega. \quad (10)$$

Табл. 1. Результаты расчета затрат энергии на реализацию динамических составляющих касательной силы МТА на базе трактора К-744Р-05 с плугом ПУН-8-40 в режиме пахоты тяжелого грунта при скорости $v_o=2,01 \text{ м/с}$

Комплекта- ция дизеля ЯМЗ-238НД5	Компоненты динамической составляющей касательной силы $F_{\text{еi}}^{\text{I}}(\omega)$, кН и затрат энергии $\dot{Y}_i^{\text{I}}(\omega)$, кДж/с при жесткости $c_1 = 1500 \text{ кН/м}$			Динамические составляющие касательной силы $F_{\text{е}}^{\text{I}}(\omega)$, кН и затрат энергии $\dot{Y}^{\text{I}}(\omega)$, кДж/с в зависимости от жесткости c_1 , кН/м		
	1	2	3	1500	1200	900
штатная	<u>12,74</u> 25,61	<u>20,07</u> 40,33	<u>0,002</u> 0,004	<u>32,81</u> 65,95	<u>29,26</u> 58,81	<u>25,19</u> 50,62
Эффективно используемая регулярная составляющая касательной силы $F_{\text{еа}}^{\text{I}} = F_{\text{е}\Sigma}^{\text{I}} - F_{\text{е}}^{\text{I}}(\omega)$				73,62		
Эффективно используемая регулярная составляющая энергии $\dot{Y}_{\text{а}}^{\text{I}} = \dot{Y}_{\Sigma}^{\text{I}} - \dot{Y}^{\text{I}}(\omega)$				147,98		

Примечание: в числителе дроби представлены динамические составляющие касательной силы, в знаменателе – затрат энергии.

Для оценки эффективности МТА по энергозатратам в режиме пахоты тяжелого грунта (11) проинтегрируем функцию $F_{\kappa\Sigma}(\omega, \nu_o)$, с учетом выражений для постоянной $F_{\hat{e}\hat{i}}^{\ddot{i}}$ (1) и переменной $F_{\hat{e}}^{\ddot{i}}(\omega, \nu_{\hat{i}})$ (2) суммарных составляющих $F_{\kappa\Sigma}(\omega, \nu_o)$:

$$\dot{Y}_{\Sigma}^{\ddot{i}} = \frac{1}{\omega_{\text{н}}} \cdot \int_{\nu_{\hat{i}}} \int_{\omega} F_{\hat{e}\Sigma}(\omega, \nu_{\hat{i}}) \cdot d\omega \cdot d\nu_{\hat{i}}. \quad (11)$$

где $\omega_{\text{н}}$ – собственная низшая частота процесса [1,2].

При пахоте тяжелого грунта условия функционирования МТА усложняются: $f_{\hat{o}\hat{e}} = 0,15$; $f_{\hat{o}\hat{n}} = 0,60$; $\hat{e}_{\hat{i}} = 6 \cdot 10^4$ Н/м; $\xi = 2000$ кг/м³.

Переменная составляющая часового расхода топлива $B^{\ddot{i}}(\omega, \nu_o)$ в пахотном режиме определяется выражением [1,2]

$$\begin{aligned} B^{\ddot{i}}(\omega, \nu_{\hat{i}}) = & E_1 M_{\hat{i}}^{\dot{a}} \omega \cdot |U_{11}(j\omega, \nu_{\hat{i}})| \left\{ \frac{R}{i_{\hat{o}} \eta_{\hat{i}}} [A_{\hat{i}}^{\ddot{i}} + A_2 + 3A_3 |U_{11}^2(j\omega, \nu_{\hat{i}})| + \right. \\ & + 2A_4 \omega \cdot |U_{11}(j\omega, \nu_{\hat{i}})| + 2f_{\hat{o}\hat{e}} |\Theta_{\hat{a}}^{\ddot{i}}(j\omega, \nu_{\hat{i}})|] + \\ & \left. + D_1 \cdot \left[\frac{a_1}{P_{\text{н}}} \sqrt{\frac{4\omega^2 + \gamma^2}{\omega^2 + \gamma^2}} \cdot |G_{61}(j\omega, \nu_{\hat{i}})| + 2b_1 \omega \cdot |U_{11}(j\omega, \nu_{\hat{i}})| \right] \right\}. \quad (12) \end{aligned}$$

Согласно формуле (12) вычислены потери часового расхода топлива по каждой компоненте динамической составляющей в спектре частот $0 \dots 20$ с⁻¹, а также величина динамической составляющей для различных значений $c_1 = 1500, 1200, 900$ кН/м (табл. 2):

1 – от сопротивления на подъеме с плугом

$$B_1^{\text{п}}(\omega) = \frac{E_1 R \cdot M_{\text{н}}^a}{i_{\text{T}} \eta_{\text{м}} \omega_{\text{н}}} \cdot \int_{\omega=0}^{\omega=20} \omega |U_{11}(j\omega)| \cdot [A_1^{\text{п}} + A_2 + 3A_3 \cdot |U_{11}^2(j\omega)|] d\omega; \quad (13)$$

2 – от динамики сопротивления плуга (подрезания и отброса пласта)

$$B_2^{\text{п}}(\omega) = \frac{E_1 R \cdot M_{\text{н}}^a}{i_{\text{T}} \eta_{\text{м}} \omega_{\text{н}}} \cdot \int_{\omega=0}^{\omega=20} \omega |U_{11}(j\omega)| \cdot [A_2 + 3A_3 \cdot |U_{11}^2(j\omega)|] d\omega; \quad (14)$$

3 – от колебаний подвеса МТА в продольно-вертикальной плоскости

$$B_3^{\text{п}}(\omega) = \frac{2E_1 R \cdot f_{\text{тк}} \cdot M_{\text{н}}^a}{i_{\text{T}} \eta_{\text{м}} \omega_{\text{н}}} \cdot \int_{\omega=0}^{\omega=20} \omega |U_{11}(j\omega)| \cdot |\Theta_{\text{в}}^{\text{п}}(j\omega)| d\omega; \quad (15)$$

4 – от инерционных сил МТА

$$B_4^{\text{II}}(\omega) = \frac{2E_1 R \cdot M_{\text{H}}^a}{i_{\text{T}} \eta_{\text{M}} \omega_{\text{CH}}} A_4 \cdot \int_{\omega=0}^{\omega=20} \omega^2 |U_{11}^2(j\omega)| d\omega; \quad (16)$$

5 – от механических потерь в парах трения двигателя

$$B_5^{\text{II}}(\omega) = \frac{\dot{A}_1 D_1 \cdot \dot{I}_1}{\omega_{\text{HII}}} \cdot \int_{\omega=0}^{\omega=20} \omega |U_{11}(j\omega)| \cdot \left[\frac{a_1}{P_{\text{HII}}} \sqrt{\frac{4\omega^2 + \gamma^2}{\omega^2 + \gamma^2}} \cdot |G_{61}(j\omega)| + \right. \\ \left. + 2b_1 \omega \cdot |U_{11}(j\omega)| \right] d\omega; \quad (17)$$

– суммарные потери часового расхода топлива на динамические нагрузки в зависимости от жесткости c_1

$$\hat{A}^{\text{II}}(\omega) = \frac{\dot{I}_1}{\omega_{\text{HII}}} \cdot \int_{\omega=0}^{\omega=20} |G_{31}^{\text{II}}(j\omega)| d\omega. \quad (18)$$

где $G_{31}^{\text{II}}(j\omega)$ – передаточная функция часового расхода топлива в пахотном режиме [1].

Фактический часовой расход топлива $\hat{A}_0^{\text{II}}$ в пахотном режиме, с учетом потерь на динамические нагрузки, определится суммой

$$\hat{A}_0^{\text{II}} = \hat{A}_1^{\text{II}} + \hat{A}^{\text{II}}(\omega, v_{\text{T}}). \quad (19)$$

Табл. 2. Результаты расчета часового расхода топлива МТА на базе трактора К-744Р-05 с плугом ПУН-8-40 в режиме пахоты тяжелого грунта при скорости $v_0 = 2,01$ м/с

Комплектация дизеля ЯМЗ-238НД5	Компоненты динамической составляющей $B_i^{\text{II}}(\omega)$, кг/ч при жесткости $c_1 = 1500$ кН/м					Динамические составляющие $B^{\text{II}}(\omega)$, кг/ч в зависимости от жесткости c_1 , кН/м		
	1	2	3	4	5	1500	1200	900
штатная	4,09	6,20	3,00	0,12	0,58	13,99	13,65	13,21
Регулярная составляющая часового расхода топлива B_1^{II} , кг/ч						40,31		
Фактический часовой расход топлива $B_0^{\text{II}} = B_1^{\text{II}} + B^{\text{II}}(\omega)$, кг/ч						54,23	53,96	53,52

Результаты исследования.

Максимальная нагруженность от сопротивления на подъем составляет 11,92 кН при частоте $5,0 \text{ с}^{-1}$ – первый экстремум (рис. 1, а, кривая 1), соответствует собственной резонансной частоте колебаний частоты вращения коленчатого вала двигателя [5]. Нагруженность, создаваемая

колебаниями МТА в продольно-вертикальной плоскости, имеет один экстремум при частоте $15,1 \text{ с}^{-1}$ с амплитудой, равной $16,22 \text{ кН}$ (рис. 1, а, кривая 2), величина которой зависит от жесткости подвеса МТА. Суммарная динамическая составляющая касательной силы представлена кривой 3.

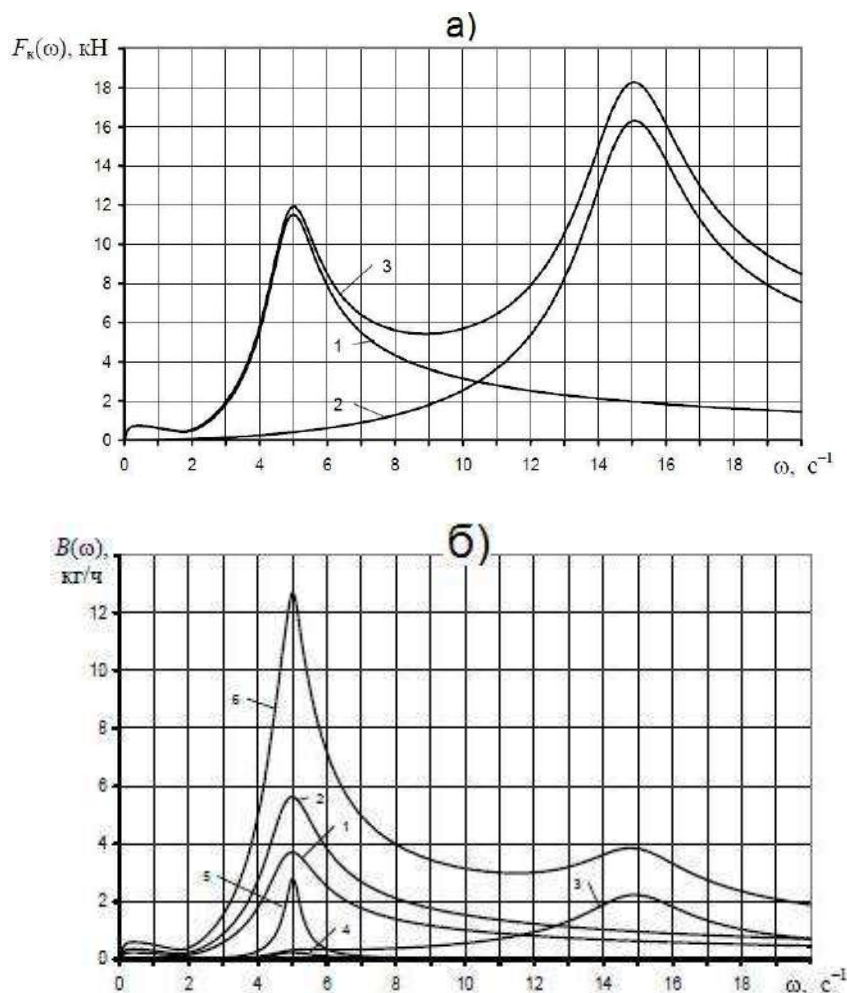


Рис. 1. ЧХ компонентов динамической составляющей касательной силы (а) и часового расхода топлива (б) при скорости движения $v_l = 2,01 \text{ м/с}$ МТА на базе трактора К-744Р-05 с плугом ПУН-8-40 в режиме пахоты тяжелого грунта при жесткости подвеса $c_1 = 1500 \text{ кН/м}$:

а) 1 – от действия инерционных сил МТА; 2 – от колебаний МТА в продольно-вертикальной плоскости; 3 – суммарная динамическая составляющая;

б) 1 – сопротивление движению на подъеме; 2 – подрезание и отброс пласта плугом; 3 – колебания МТА в продольно-вертикальной плоскости; 4 – инерционные силы; 5 – механические потери в парах трения двигателя; 6 – суммарный расход на динамические нагрузки

Частотные характеристики (ЧХ) часового расхода топлива в пахотном режиме также имеют два экстремальных максимума (рис. 1, б, кривая б) на собственных частотах: при $\omega_c = 5,0 \text{ с}^{-1}$ – 12,69 кг/ч; при $\omega_c = 14,8 \text{ с}^{-1}$ – 3,85 кг/ч.

По составляющим формулы (12) экстремальные максимумы часового расхода топлива по компонентам на собственных частотах приходятся: на сопротивление при движении на подъеме – 3,71 кг/ч на $\omega_c = 5,0 \text{ с}^{-1}$ (кривая 1); на подрезание и отброс пласта – 5,62 кг/ч на $\omega_c = 5,0 \text{ с}^{-1}$ (кривая 2); на колебания МТА в продольно-вертикальной плоскости – 2,23 кг/ч на $\omega_c = 14,9 \text{ с}^{-1}$ (кривая 3); на инерционные силы – 0,24 кг/ч на $\omega_c = 5,0 \text{ с}^{-1}$ (кривая 4); на механические потери в парах трения двигателя – 2,80 кг/ч на $\omega_c = 5,0 \text{ с}^{-1}$ (кривая 5).

Фактический часовой расход топлива, при штатной комплектации трактора и жесткости подвеса $c_1 = 1500 \text{ кН/м}$, в режиме пахоты тяжелого грунта и скорости движения $v_0 = 2,01 \text{ м/с}$ составляет 54,23 кг/ч.

Заключение.

Исследованиями [1,6,7] выявлены причины повышенных затрат мощности на динамические составляющие нагрузки и часового расхода топлива дизеля ЯМЗ-238НД5:

- повышенное остаточное давление в топливопроводе высокого давления системы питания дизеля;
- большая амплитуда давления топлива на впрыске, пропорциональная амплитуде колебаний рейки топливного насоса (РТН) в интервале собственных частот [1];
- сложение давления на впрыске с остаточным давлением в топливопроводе высокого давления исключает возможность точного дозирования цикловой подачи топлива;
- большие амплитуды и фазовые запаздывания изгибно-крутильных колебаний кулачкового вала топливного насоса высокого давления в интервале собственных частот [1] нарушают своевременный впрыск топлива в камеру сгорания.

Перечисленными факторами исключается точное дозирование величины цикловой подачи, своевременный впрыск топлива и качественный процесс сгорания рабочей смеси.

Для лесохозяйственного МТА на базе трактора К-744Р-05 с дизелем ЯМЗ-238НД5 разработаны и опробованы пути снижения установленных негативных закономерностей введением демпфирующих и корректирующих устройств в системы поддрессоривания МТА, регулирования скорости и подачи масла к парам трения двигателя [1-4].

Библиографический список

1. Антипин В.П., Дурманов М.Я., Каршев Г.В. Производительность, энергозатраты и ресурс машинно-тракторного агрегата. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 484 с.
2. Durmanov, M.Ya., Martynov, B.G., Spiridonov, S.V. Energy and Fuel Consumption of Agricultural Aggregate // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2018), Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2019. – PP. 1601-1612.
3. Antipin, V.P., Durmanov, M. Ya., Mikhailov, O.A. Method to Reduce Oil Burning in Diesel Engine of Agricultural Machine and Tractor Unit. // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019), Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer, Cham, 2020. – PP. 313-323.
4. Antipin, V.P., Durmanov, M. Ya., Mikhailov, O.A. How the parameters of an agricultural machine and tractor unit affect the wear of friction pairs in a diesel engine when used for transport // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020), Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer, Cham, 2021. – PP. 313-320.
5. Крутов В.И., Данилов Ф.М., Кузьмич П.К. [и др.]. Основы теории автоматического регулирования. – Москва: Машиностроение, 1984. – 368 с.
6. А.с. №353169. Стенд для испытания двигателя внутреннего сгорания и трансмиссии / В.П. Антипин, М.Я. Суцевский, Е.П. Табаков; опубл. 29.09.72. – Бюл. № 29, 1972.
7. А.с. № 364859. Способ испытания двигателя / В.П. Антипин, В.В. Свиткин, М.Я. Суцевский, Е.П. Табаков; опубл. 29.09.72. – Бюл. № 5, 1973.

Сведения об авторах

ФИО	Дурманов Михаил Яковлевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5 литер У, Санкт- Петербург, Россия
SPIN-код	3809-9956
e-mail	pslm218@yandex.ru

ФИО	Спиридонов С.ергей Васильевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5 литер У, Санкт- Петербург, Россия
SPIN-код	9649-6007
e-mail	svslta@yandex.ru

Аннотация

Анализ компонент технико-экономических критериев (ТЭК) функционирования лесохозяйственного машинно-тракторного агрегата (МТА) позволяет выявить на этапе конструирования несоответствия динамических параметров трактора и лесохозяйственных агрегатов, которые приводят к неудовлетворительным эксплуатационным и экономическим показателям эффективности использования МТА. Базовыми ТЭК являются касательная сила тяги и часовой расход топлива дизеля, поскольку определяют сменную производительность и эксплуатационные затраты лесохозяйственного МТА и определяют стоимость лесохозяйственных работ. Анализ компонент ТЭК проведен на примере пахотного режима работы трактора «Кировец» К-744Р-05 с плугом ПУН-8-40 на тяжелых почвах.

Ключевые слова: технико-экономический критерий, машинно-тракторный агрегат, энергозатраты, касательная сила, часовой расход топлива, амплитудно-частотная характеристика, частотная характеристика

УДК 630*375.4

Разделы рубрикатора ГРНТИ: 55.01.77; 55.42.03; 55.57.29; 68.01.77; 68.29.15; 68.85.29

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННОГО МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА НА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ

Дурманов М.Я., Спиридонов С.В.

Введение.

Создание лесопромышленного комплекса интенсивного типа в России базируется на создании и эксплуатации лесных питомников и интенсивном плантационном лесовыращивании с последующей заготовкой и вывозкой древесного сырья в виде сортиментов и/или щепы [1,2]. Для интенсивного лесовыращивания и проведения большого объема лесохозяйственных работ требуется система машин и механизмов, созданная на базе энергонасыщенных тракторов, - например, на базе сельскохозяйственного трактора «Кировец» К-744Р-05, выпускаемом серийно АО «ПТЗ».

Метод [3,4], учитывающий энергозатраты на реализацию касательной силы тяги, позволяет оценивать на стадии проектирования машинно-тракторного агрегата (МТА) не только регулярную и динамическую составляющие касательной силы, но и часовой расход топлива. Результаты моделирования представлены поверхностями состояния амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), касательной силы тяги МТА и часового расхода топлива, для варьируемых конструктивных параметров. Объем, ограниченный поверхностью состояния АЧХ касательной силы и осями координат, рассматривается как энергия, часть которой расходуется на реализацию регулярной касательной силы, а другая - как потери на динамическую составляющую касательной силы. Выполняя сечения поверхностей состояния АЧХ в продольно-вертикальной плоскости при любом фиксированном значении регулярной скорости движения МТА и по всему диапазону частот колебаний нагрузки на ведущих колесах вычисляются регулярная и динамическая составляющие касательной силы и часового расхода топлива. В статье рассматривается пахотный режим работы трактора «Кировец» К-744Р-05 с плугом ПУН-8-40 на тяжелых почвах.

Цель работы – моделирование энергозатрат лесохозяйственного МТА при работе с различными машинами и механизмами позволяет комплексно оценить эксплуатационную эффективность МТА, особенно

актуальную на этапе проектирования трактора и перспективных навесных орудий и машин [3,4].

Методы исследования.

Для доказательства эффективности предлагаемого метода разработаны аналитические теоретико-экспериментальные модели функционирования лесохозяйственного МТА на базе сельскохозяйственного колесного трактора класса тяги 50 кН при установившихся режимах функционирования. Предлагаемые технико-экономические критерии (ТЭК) позволяют комплексно оценить функционирование МТА на различных режимах функционирования.

Исследования силовых передач, исполнительных механизмов и агрегатов МТА в большинстве случаев ограничиваются их динамической нагруженностью [5,6] и не затрагивают энергетические показатели, связанные с расходом топлива и масла на угар, затратами мощности, интенсивностью износа пар трения двигателя, которые являются ТЭК функционирования МТА [3]. Поэтому весьма актуальной остается задача энергетической оценки динамических процессов МТА, теория и практика снижения энергозатрат [3,4] и увеличения ресурса энергосиловой установки. Минимизация энергии, необходимой для выполнения технологических операций, снижает количество требуемого топлива и эксплуатационные затраты МТА, что в конечном итоге удешевляет стоимость лесохозяйственных работ.

Метод, учитывающий энергозатраты на реализацию касательной силы тяги, позволяет оценивать на стадии проектирования МТА не только часовой расход топлива и масла на угар, но и эффективно используемую мощность и скорость объемного изнашивания пар трения дизеля [3]. Таким образом, задача исследования заключается в доказательстве эффективности метода, путем сравнительного анализа эксплуатационных показателей МТА с разными конструктивными параметрами.

Аналитические выражения выходных ТЭК лесохозяйственного МТА при установившихся режимах функционирования приведены ниже.

Согласно рекомендациям СПбНИИЛХ [1,2] по выращиванию ели и сосны, оптимальных пород для условий Северо-Западной таёжной зоны России, необходимо учесть почвенно-грунтовые условия в местах закладки лесных питомников и плантаций. Под лесные питомники и плантации могут быть выделены площади, выведенные из сельскохозяйственного оборота, заброшенные торфоразработки и прочие земли, где возможно применение универсальных сельскохозяйственных почвообрабатывающих машин,

которые необходимо агрегатировать с трактором класса тяги не менее 50 кН [7,8].

Касательная сила тяги представляет собой реакцию на изменения сил сопротивления движению МТА, зависящую от установки органа $h_0(t)$, задающего величину цикловой подачи топлива, скорости движения МТА и характеристик обрабатываемой почвы [6].

Согласно формуле академика В. П. Горячкина [9] касательная сила в пахотном режиме $F_{\hat{e}}^i$ состоит из двух компонент, - регулярная компонента касательной силы $F_{\hat{e}}^i$ затрачивается на преодоление регулярных сил сопротивления, а переменная компонента $F_{\hat{e}}^i(\omega, v_i)$ - на преодоление переменной составляющей нагрузки на ведущих колесах и в силовой передаче [3,4]:

$$F_{\hat{e}}^i = mg \cdot \sin \alpha + (f_{\hat{o}\hat{e}}m_{\hat{o}} + f_{\hat{o}\hat{n}}m_{\hat{n}})g \cos \alpha + \hat{e}_i ab + \left(\frac{\pi R}{30i_{\hat{o}}}\right)^2 \xi ab n_0^2; \quad (1)$$

где m – масса МТА, $m = m_{\hat{o}} + m_{\hat{n}}$; $m_{\hat{o}}$ – масса трактора; $f_{\hat{o}\hat{e}}$ – коэффициент трения качения; $m_{\hat{n}}$, $f_{\hat{o}\hat{n}}$ – масса плуга и коэффициент трения о дно и стенку борозды; α – угол подъема участка пути; $\hat{e}_i$ – удельное сопротивление почвы; a, b – глубина обработки почвы и ширина захвата плуга; g – ускорение свободного падения; n_0 – регулярная составляющая частоты вращения двигателя: $n_0 = 0.8n_i$; n_i – номинальная частота вращения коленчатого вала дизеля; ω – частота колебания нагрузки; ξ, v_0 – коэффициент динамичности и регулярная скорость движения агрегата.

Основными конструктивными параметрами МТА являются: масса трактора и орудия, мощность двигателя, жесткость подвеса трактора и т.д. Масса трактора определяет тяговое усилие, а мощность – скорость движения [6].

Выразим одну из компонент энергозатрат МТА - скорость движения v , через частоту вращения коленчатого вала двигателя n , и конструктивные параметры ходовой части R и трансмиссии $i_{\hat{o}}$, полагая пробуксовывание минимальным [3,4,6]

$$v = \frac{\pi R n}{30 i_{\hat{o}}}, \quad (2)$$

где R – радиус ведущего колеса; $i_{\hat{o}}$ – передаточное число трансмиссии; n – частота вращения коленчатого вала двигателя.

В формуле часового расхода топлива [3,6,10]

$$B = 3,6q_{\ddot{o}}\omega_{\ddot{a}}i_{\ddot{a}}/\pi\tau_{\ddot{a}},$$

значение цикловой подачи $q_{\ddot{o}}$ выразим через средний индикаторный крутящий момент, для чего перейдем от угловой скорости $\omega_{\ddot{a}}$ к частоте вращения n , $\omega_{\ddot{a}} = \pi n/30$. Согласно [10] выражение цикловой подачи топлива

$$q_{\text{ц}} = \frac{\pi\tau_{\text{д}}M_i}{\eta_i H_u i_{\text{д}}}, \quad (3)$$

тогда

$$B = \frac{3,6\pi M_i n}{30 H_u \eta_i}, \quad (4)$$

где M_i – средний индикаторный крутящий момент; η_i – индикаторный КПД двигателя; H_u – низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг; $\eta_i = 0,40$; $H_u = 41300$ кДж/кг.

Средний индикаторный крутящий момент, развиваемый двигателем, затрачивается на момент механический потерь $\dot{I}_{\ddot{\text{и}}}$ в парах трения и эффективный крутящий момент $\dot{I}_{\ddot{a}}$

$$M_i = M_e + \dot{I}_{\ddot{\text{и}}} . \quad (5)$$

Эффективный крутящий момент

$$M_{\ddot{a}} = F_{\ddot{e}} R / i_{\ddot{o}} \eta_{\ddot{i}}, \quad (6)$$

где $\eta_{\ddot{i}}$ – механический КПД, $\eta_{\ddot{i}} = \eta_{\ddot{o}} \times \eta_{\ddot{a}\ddot{e}}$; $\eta_{\ddot{o}}$, $\eta_{\ddot{a}\ddot{e}}$ – КПД трансмиссии и движителя, соответственно.

Выполненные исследования влияния частоты вращения и давления масла в главной масляной магистрали двигателя размерности 8Ч13/14Н (ЯМЗ-238НД5) на специальном стенде [11] по методике [12] позволили уточнить общепринятое выражение [13] момента механических потерь в парах трения [14]

$$\dot{I}_{\ddot{\text{и}}} = \frac{V_{\ddot{o}} i_{\ddot{a}}}{\pi \tau_{\ddot{a}}} \left(\frac{a_1 P_{\ddot{i}}}{P_{\ddot{и}} \dot{a}^{\gamma t}} + b_1 n \right), \quad (7)$$

где $V_{\text{ц}}$ – рабочий объем одного цилиндра двигателя; $i_{\text{д}}$ – количество цилиндров в двигателе; a_1 , b_1 – коэффициенты, получаемые экспериментальным путем для каждого типа двигателей; $P_{\text{мн}}$ – давление масла в главной масляной магистрали при номинальной частоте вращения; $\gamma = 10^{-3} \omega_{\text{н}}$; $\omega_{\text{н}}$ – номинальная угловая скорость вращения коленчатого вала; $\tau_{\text{д}}$ – коэффициент тактности двигателя.

Подставляя (2), (5)-(7) в (4), получим выражение часового расхода топлива в пахотном режиме

$$B_1^i = A_1 n \cdot \left\{ \frac{R}{i_0 \eta_i} [\dot{A}_1^i + \dot{A}_2 + \dot{A}_3 n^2 + f_{\hat{o}\hat{e}} \ddot{F}_{\hat{a}}^i(t) + \dot{A}_4 \frac{dn(t)}{dt}] + D_1 \left(\frac{a_1 P_1}{P_{11}} \frac{1}{\hat{a}^{\gamma t}} + b_1 n \right) \right\}, \quad (8)$$

где $E_1 = \frac{3,6\pi}{30\eta_i H_{\hat{e}}}$; $A_1^i = mg \sin \alpha + f_{\hat{o}\hat{e}} m_{\hat{o}} g \cos \alpha$; $A_2 = f_{\hat{o}\hat{n}} m_{\hat{e}} g \cos \alpha + \hat{e}_i ab$;

$$A_3 = \left(\frac{\pi R}{30 i_0} \right)^2 \xi ab; \quad A_4 = \frac{\pi R}{30 i_0} m; \quad D_1 = \frac{V_{\hat{o}} i_{\hat{a}}}{\pi \tau_{\hat{a}}}.$$

Затраты средней индикаторной мощности аналогично равны

$$N_{11}^i = \frac{\pi n}{30} \left\{ \frac{R}{i_0 \eta_i} [\dot{A}_1^i + \dot{A}_2 + \dot{A}_3 n^2 + f_{\hat{o}\hat{e}} \ddot{F}_{\hat{a}}^i(t) + \dot{A}_4 \frac{dn(t)}{dt}] + D_1 \left(\frac{a_1 P_1}{P_{11}} \frac{1}{\hat{a}^{\gamma t}} + b_1 n \right) \right\}. \quad (9)$$

Через скорость движения v энергозатраты и часовой расход топлива B лесохозяйственного МТА связаны с производительностью МТА на операциях основной обработки почвы (пахоте) под лесные культуры, га/ч [3,4,9]

$$\dot{I} = 0,36 \hat{E}_{\hat{o}} b v, \quad (10)$$

где $\hat{E}_{\hat{o}}$ – коэффициент использования рабочего времени на основную работу.

Определяем поверхности состояния амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) касательной силы (рис. 1, а) и часового расхода топлива (рис. 1, б) в пахотном режиме, для следующих исходных данных [3]: $n_i = 1900 \text{ мин}^{-1}$; $M_{e1} = 1239 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $F_c^a = 0,15 M_{e1}$; $\eta_i = 0,8$; $R = 0,8 \text{ м}$; $m_{\hat{o}} = 13400 \text{ кг}$; $m_{\hat{e}} = 2250 \text{ кг}$; $a = 0,15 \text{ м}$; $b = 3,2 \text{ м}$. При пахоте тяжелого грунта примем следующие условия функционирования МТА: $f_{\hat{o}\hat{e}} = 0,15$; $f_{\hat{o}\hat{n}} = 0,60$; $\hat{e}_i = 6 \cdot 10^4 \text{ Н/м}$; $\xi = 2000 \text{ кг/м}^3$; $\alpha = 3^\circ$ [3,4]. Регулярная компонента касательной силы, затрачиваемая на преодоление регулярных сил сопротивления находится ниже поверхности $F_{\hat{e}1}^i$, а переменная компонента – выше (рис. 1, а). Аналогично определяются компоненты часового расхода топлива (рис. 1, б).

Количество энергии, затрачиваемое на реализацию регулярной составляющей касательной силы по всему объему, ограниченному поверхностью состояния АЧХ $F_{\hat{e}1}^i$ и осями координат (рис. 1, а), определяется выражением

$$\dot{Y}_{\Sigma}^i = \frac{1}{\omega_{\hat{n}i}} \cdot \int_{\omega_{\hat{n}i}} \int_{v_1} \ddot{F}_{\hat{e}1}^i(\omega, v_1) \cdot d\omega \cdot dv_1. \quad (11)$$

где $\omega_{\text{сн}}$ – собственная низшая частота процесса [3].

Результаты исследования.

В итоге, функциями (8), (9) и (10) определен физический смысл технико-экономических критериев (ТЭК) эффективности использования МТА по энергозатратам и производительности, при работе в установившихся нагрузочном и скоростном режимах. Они зависят от характеристик обрабатываемой поверхности почвы (пашни), конструктивных параметров МТА и механических потерь в двигателе.

Разработанная модель позволяет выявить на стадии проектирования агрегатов лесохозяйственного МТА конструктивные параметры, позволяющие снизить энергозатраты и расход углеводородного топлива. Затраты энергии на реализацию регулярной составляющей касательной силы в режиме пахоты тяжелого грунта при всех значениях жесткости подвеса есть величина постоянная и, согласно (1), (11), равна 2186 кДж/с^2 . Регулярная составляющая часового расхода топлива $\hat{A}_1^{\ddot{}}$, определяемая из выражения (8), равна $40,31 \text{ кг/ч}$.

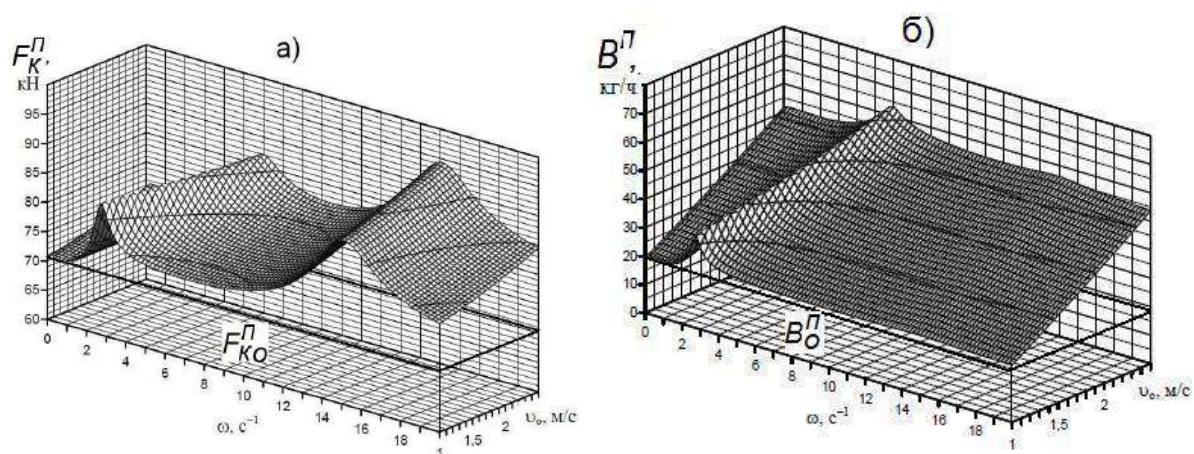


Рис. 1. Поверхности состояния АЧХ касательной силы (а); часового расхода топлива (б) при скорости движения $U_1 = 2,01 \text{ м/с}$ МТА на базе трактора К-744Р-05 с плугом ПУН-8-40 в режиме пахоты тяжелого грунта при жесткости подвеса $c_1 = 1500 \text{ кН/м}$

Заключение.

Для дизельного двигателя ЯМЗ-238НД5 выявлена резонансная частота $\omega_c = 5,0 \text{ с}^{-1}$, сопровождаемая повышенной динамической нагруженностью, энергозатратами и расходом топлива.

Причинами повышенных энергозатрат и динамической нагруженности в силовой передаче являются:

- близость собственных (резонансных) частот системы поддрессирования МТА при колебаниях в продольно-вертикальной плоскости к резонансной частоте колебаний скорости вращения вала двигателя;
- несовершенство систем регулирования скорости, подачи топлива в камеру сгорания и смазочного масла к парам трения двигателя, выраженное в наличии резонансных частот, близких к собственным частотам системы поддрессирования МТА.

Для эффективного использования трактора «Кировец» К-744Р-05 в составе лесохозяйственного МТА разработаны и опробованы пути снижения установленных негативных закономерностей введением демпфирующих и корректирующих устройств в системы поддрессирования МТА, регулирования скорости и подачи масла к парам трения двигателя [3,4,14].

Библиографический список

1. *Шутов И.В., Маслаков Е.Л., Маркова И.А. и др.* Лесные плантации (ускоренное выращивание ели и сосны). – Москва: Лесная промышленность. 1984. – 248 с.
2. *Плантационное лесоводство* / под ред. И.В. Шутова. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 366 с.
3. *Антипин В.П., Дурманов М.Я., Каршев Г.В.* Производительность, энергозатраты и ресурс машинно-тракторного агрегата. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 484 с.
4. *Власов Е.Н. [и др.]*. Определение количества энергии, затрачиваемой на реализацию касательной силы трактора ЛХТ-100 в пахотном режиме // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2015. – Вып. 212. – С. 104-112.
5. *Лурье А.Б.* Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. – Ленинград: Колос, 1970. – 376 с.
6. *Барский И.Б., Анилович В.Я., Кутьков Г.М.* Динамика трактора. – Москва: Машиностроение, 1973. – 280 с.
7. *Шумаков В.С., Кураев В.Н.* Современные способы подготовки почв под лесные культуры. – Москва: Лесная промышленность, 1973. – 160 с.
8. *Корниенко П.П., Сериков Ю.М., Зинин В.Ф., Казаков В.И.* Механизация обработки почвы под лесные культуры. – Москва: Агропромиздат, 1987. – 247 с.
9. *Горячкин В. П.* Собрание сочинений. – 2-е изд. – Москва: Колос, 1968. – Т. 1. – 720 с.

10. Крутов В.И., Данилов Ф.М., Кузьмик П.К. [и др.]. Основы теории автоматического регулирования. – Москва: Машиностроение, 1984. – 368 с.
11. А.с. №353169. Стенд для испытания двигателя внутреннего сгорания и трансмиссии / В.П. Антипин, М.Я. Суцевский, Е.П. Табаков; опубл. 29.09.72. – Бюл. № 29, 1972.
12. А.с. № 364859. Способ испытания двигателя / В.П. Антипин, В.В. Свиткин, М.Я. Суцевский, Е.П. Табаков; опубл. 29.09.72. – Бюл. № 5, 1973.
13. Ждановский Н.С., Ковригин А.И., Шкрабак В.С. [и др.]. Неустановившиеся режимы. – Ленинград: Машиностроение, 1974. – 224 с.
14. Антипин В.П., Дурманов М.Я., Каршев ГВ., Михасенко В.И. Износ двигателя на неустановившихся нагрузочном, скоростном и смазочном режимах. – Санкт-Петербург: Двигателестроение, 2006. – №1 (223). – С. 7-9.

Сведения об авторах

ФИО	Дурманов Михаил Яковлевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5 литер У, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	3809-9956
e-mail	pslm218@yandex.ru

ФИО	Спиридонов Сергей Васильевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5 литер У, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	9649-6007
e-mail	svslta@yandex.ru

Аннотация

Касательная сила тяги совместно с часовым расходом топлива дизеля являются важными факторами эксплуатационной и экономической

эффективности использования лесохозяйственного машинно-тракторного агрегата (МТА) и определяют стоимость лесохозяйственных работ и стоимость обработки 1 га почвы. Указанные факторы являются определяющими для ТЭК функционирования МТА на разных режимах. В статье рассматривается пахотный режим работы трактора «Кировец» К-744Р-05 с плугом ПУН-8-40 на тяжелых почвах. Для указанных режимов построены поверхности состояния АЧХ касательной силы тяги МТА и часового расхода топлива дизеля ЯМЗ-238НД5 в штатной комплектации.

Ключевые слова: машинно-тракторный агрегат, сельскохозяйственный трактор, энергозатраты, касательная сила, часовой расход топлива, амплитудно-частотная характеристика

УДК 630*375.4

Разделы рубрикатора ГРНТИ: 55.01.77; 55.42.03; 55.57.29; 68.01.77; 68.29.15; 68.85.29

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННОГО МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА НА НЕУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ

Дурманов М.Я., Спиридонов С.В.

Введение.

Для интенсивного лесовыращивания и проведения большого объёма лесохозяйственных работ, при создании и эксплуатации лесных питомников и плантаций, требуется система машин и механизмов, созданная на базе энергонасыщенных тракторов [1,2], например, на базе сельскохозяйственного трактора «Кировец» К-744Р-05, выпускаемом серийно АО «ПТЗ». Под лесные питомники и плантации могут быть выделены площади, выведенные из сельскохозяйственного оборота, заброшенные торфопеработки и прочие земли, где возможно применение универсальных сельскохозяйственных почвообрабатывающих машин, которые необходимо агрегатировать с трактором класса тяги не менее 50 кН [3,4].

Технико-экономические критерии (ТЭК) функционирования машинно-тракторного агрегата (МТА) – это система комплексных показателей качества проектирования трактора и агрегируемых с ним

механизмов для проведения полного спектра лесохозяйственных работ [5]. Например, в настоящее время для разработки и создания сельскохозяйственных машин и агрегатов широко используются методы статистической динамики [6], научная база земледельческой механики [7] и существующие теории МТА [8]. Метод оценки ТЭК, учитывающий энергозатраты на реализацию касательной силы тяги, позволяет оценивать на стадии проектирования МТА не только часовой расход топлива и масла на угар [9,10], но и эффективно используемую мощность и скорость объемного изнашивания пар трения дизеля [11].

Метод [5,9-11], учитывающий энергозатраты на реализацию касательной силы тяги, позволяет оценивать на стадии проектирования МТА не только регулярную и динамическую составляющие касательной силы, но и часовой расход топлива. Результаты моделирования представлены поверхностями состояния амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), касательной силы тяги МТА и часового расхода топлива, для варьируемых конструктивных параметров. Объем, ограниченный поверхностью состояния АЧХ касательной силы и осями координат, рассматривается как энергия, часть которой расходуется на реализацию регулярной касательной силы, а другая - как потери на динамическую составляющую касательной силы. Выполняя сечения поверхностей состояния АЧХ в продольно-вертикальной плоскости при любом фиксированном значении регулярной скорости движения МТА и по всему диапазону частот колебаний нагрузки на ведущих колесах вычисляются регулярная и динамическая составляющие касательной силы и часового расхода топлива. В статье рассматривается пахотный режим работы трактора «Кировец» К-744Р-05 с плугом ПУН-8-40 на тяжелых почвах.

Цель работы.

При проектировании перспективных лесохозяйственных машин весьма актуальной остается задача энергетической оценки динамических процессов МТА, теория и практика снижения энергозатрат [5,9] и увеличения ресурса энергосиловой установки [11]. Минимизация энергии, необходимой для выполнения технологических операций, снижает количество требуемого топлива и эксплуатационные затраты МТА, что в конечном итоге удешевляет стоимость лесохозяйственных работ.

Таким образом, задача исследования заключается в доказательстве эффективности метода, путем сравнительного анализа эксплуатационных показателей МТА с разными конструктивными параметрами.

Методы исследования.

Для доказательства эффективности предлагаемого метода разработаны аналитические теоретико-экспериментальные модели функционирования МТА на базе сельскохозяйственного колесного трактора класса тяги 50 кН при динамических режимах нагружения. Аналитические модели представлены передаточными функциями [12]. Передаточная функция двигателя ЯМЗ-238НД5 получена экспериментально-опытным путем [13,14], а колебания подрессоренной массы МТА – теоретически [5].

Основными внешними воздействиями в моделях являются: профиль поверхности почвы (пашни), задаваемый корреляционной функцией и спектральной плотностью; факторы разнообразия физико-механических свойств почвы; скорость движения МТА. Моделируется неустановившейся характер сил сопротивления движению МТА, описываемый эргодическим стационарным случайным процессом, для всего спектра частот входного момента нагрузки. В статье рассматривается пахотный режим работы трактора «Кировец» К-744Р-05 с плугом ПУН-8-40 на тяжёлых почвах.

Аналитические выражения выходных ТЭК лесохозяйственного МТА при неустановившихся режимах функционирования представлены ниже.

Очевидно [12], что функционирование двигателей МТА реализуется на регуляторной ветви скоростной характеристики. Поэтому двигатель можно рассматривать как линейный объект управления [12,15], что значительно упрощает решение задачи энергозатрат. Выходные ТЭК можно определить совместным решением экспериментально или теоретически установленных зависимостей $v=f_1(F_c(t))$ при $h_0=\text{const}$ с известными аналитическими выражениями выходных показателей.

Для математического описания неустановившихся режимов функционирования МТА используем аппарат передаточных функций [16]. Входные воздействия для МТА: со стороны обрабатываемой почвы (пашни) – неровности микрорельефа и неоднородность почвы, являющиеся причиной колебаний сил сопротивления $F_c(t)$ на ведущих колесах; со стороны оператора – изменения положения органа $h(t)$, задающего величину цикловой подачи топлива.

Передаточные функции по возмущающему воздействию (при $h_0=\text{const}$):

- частоты вращения энергосиловой установки МТА при $s = j\omega$:

$$U_{11}(j\omega, v_i) = \frac{\hat{e}_{\bar{a}1}(T_2^2 s^2 + 2T_2\xi_1 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_3^2 s^2 + 2T_3\xi_2 s + 1)(T_4 s + 1)}, \quad (1)$$

где $\kappa_{д1}$ – коэффициент передачи частоты вращения; T_1, T_2, T_3, T_4 – постоянные времени; ξ_1, ξ_2 – коэффициенты затухания.

Для двигателя ЯМЗ-238НД5: $\kappa_{д1} = 1,85$; $T_1 = 0,796$ с; $T_2 = 0,370$ с; $T_3 = 0,199$ с; $T_4 = 0,183$ с; $\xi_1 = 0,200$; $\xi_2 = 0,150$ [5,9-11]

- колебаний остова МТА в продольно-вертикальной плоскости, определяется амплитудно-фазовыми частотными характеристиками деформации шин на единицу возмущения неровности пути при $s = j\omega$:

$$\left| \Theta_{\hat{a}}^{\ddot{}}(j\omega, c_1) \right| = z_o \hat{e}_o m_{\ddot{o}i} \omega^2 \sqrt{\frac{c^2 + \beta^2 \omega^2}{(c - m_{\ddot{o}i} \omega^2)^2 + \beta^2 \omega^2}}, \quad (2)$$

где z_o – амплитуда гармонической неровности; $m_{\text{тп}}$ – подрессоренная масса трактора в пахотном режиме; ω – частота повторения неровности, $\omega = 2\pi\nu / l_n$; ν – скорость движения трактора; l_n – длина неровности рельефа пашни; c_1 – параметр жесткости шин передней и задней осей; β_1 – параметр диссипации шин передней и задней осей; l – продольная база трактора (межосевое расстояние); κ_o – коэффициент остоности, эквивалентно замещающий две оси трактора одной обобщенной:

$$\hat{e}_o = \cos \frac{\omega \tau}{2} = \cos \frac{\omega l}{2\nu}. \quad (3)$$

Для МТА на базе трактора «Кировец» К-744Р-05 принимаем: $\tilde{n} = 2\tilde{n}_1$; $m_{\text{тп}} = 13400$ кг; $z_o = 0,03$ м; $\kappa_o = 0,707$; $\beta = 2\beta_1 = 4\nu\sqrt{c \cdot m_{\text{тп}}}$; $\nu = 0,1$; $c_1 = 1500$ кН/м.

- скорости движения МТА:

$$G_{11}(s) = \frac{\pi R}{30i_{\text{т}}} \cdot s \cdot U_{11}(s), \quad (4)$$

- касательной силы:

$$G_{21}^{\ddot{}}(s) = s \{ R \cdot U_{11}(s) \cdot [A_3 U_{11}(s) + A_4] + f_{\ddot{o}\hat{e}} \Theta_{\hat{a}}^{\ddot{}}(s, c_1) \}, \quad (5)$$

- давления масла в главной масляной магистрали двигателя:

$$G_{61}(s) = \hat{e}_{11} s \cdot U_{11}(s), \quad (6)$$

где $\kappa_{м1}$ – коэффициент передачи давления масла в главной масляной магистрали: $\kappa_{м1} = 1,35$.

- часового расхода топлива:

$$G_{31}^{\ddot{}}(s) = E_1 \cdot U_{11}(s) \left\{ \frac{R \cdot s}{i_{\ddot{o}} \eta_1} [\dot{A}_1^{\ddot{}} + \dot{A}_2 + 3A_3 \cdot U_{11}^2(s) + 2A_4 s \cdot U_{11}(s)] + \right. \\ \left. + 2 f_{\ddot{o}\hat{e}} \cdot \Theta_{\hat{a}}^{\ddot{}}(s, c_1) \right] + D_1 \left[\frac{a_1}{P_{11}} \cdot \frac{2s - \gamma}{s + \gamma} \cdot G_{61}(s) + 2b_1 s \cdot U_{11}(s) \right] \}; \quad (7)$$

где a_1, b_1 – коэффициенты, получаемые экспериментальным путем для каждого типа двигателей; $P_{\text{мн}}$ – давление масла в главной масляной магистрали при номинальной частоте вращения; $\gamma = 10^{-3}\omega_{\text{н}}$; $\omega_{\text{н}}$ – номинальная угловая скорость вращения коленчатого вала;

$$E_1 = \frac{3,6\pi}{30\eta_i H_{\dot{e}}}; A_1^i = mg \sin \alpha + f_{\dot{o}\dot{e}} m_{\dot{o}} g \cos \alpha; A_2 = f_{\dot{o}\dot{n}} m_{\dot{n}} g \cos \alpha + \hat{e}_1 ab;$$

$$A_3 = \left(\frac{\pi R}{30i_{\dot{o}}}\right)^2 \xi ab; A_4 = \frac{\pi R}{30i_{\dot{o}}} m; D_1 = \frac{V_{\dot{o}} i_{\dot{a}}}{\pi \tau_{\dot{a}}}.$$

Переменная составляющая $F_{\dot{e}}^i(\omega, v_o)$ касательной силы тяги лесохозяйственного МТА в пахотном режиме определяется выражением

$$F_k^{\text{II}}(\omega, v_o) = F_c^a [2RA_3\omega \cdot |U_{11}^2(j\omega, v_o)| + A_4\omega \cdot |U_{11}(j\omega, v_o)|] + f_{\text{тк}} |\Theta_{\text{в}}^{\text{II}}(j\omega, c_1)|, \quad (8)$$

где F_c^a – амплитуда переменной составляющей сил сопротивления движению МТА; R – радиус ведущего колеса; ω – частота колебания нагрузки; $f_{\dot{o}\dot{e}}$ – коэффициент трения качения.

Подставляя в (8) значения $|U_{11}(j\omega, v_o)|$ из (1), $|\Theta_{\dot{a}}^i(j\omega, c_1)|$ из (2), определяем поверхности состояния амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) касательной силы при движении МТА по пашне с регулярными скоростями, изменяемыми в диапазоне $v_o = 1,0 \dots 5,2$ м/с, для следующих исходных данных: $n_o = 0,8n_{\text{н}}$; $n_{\text{н}} = 1900$ мин⁻¹; $F_c^a = 0,15M_{\text{сн}}$; $M_{\text{сн}} = 1239$ Н·м; $\eta_{\text{м}} = 0,8$; $R = 0,8$ м; $m = m_{\text{т}} + m_{\text{пл}}$; $m_{\text{т}} = 13400$ кг; $m_{\text{пл}} = 2250$ кг; $a = 0,15$ м; $b = 3,2$ м.

Количество энергии, затрачиваемое на реализацию переменной составляющей касательной силы по всему объему, ограниченному поверхностью состояния АЧХ $F_{\dot{e}}^i(\omega, v_o)$ и осями координат, определяется выражением

$$\dot{Y}_{\Sigma}^i = \frac{1}{\omega_{\text{н}}} \cdot \int_{v_{\dot{1}}} \int_{\omega} F_{\dot{e}}^i(\omega, v_{\dot{1}}) \cdot d\omega \cdot dv_{\dot{1}}. \quad (9)$$

где $\omega_{\text{сн}}$ – собственная низшая частота процесса [5].

Результаты расчетов энергозатрат МТА для пахоты тяжёлого грунта приведены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты расчета затрат энергии МТА на базе трактора К-744Р-05 с плугом ПУН-8-40 в режиме пахоты тяжелого грунта

Комплектация дизеля ЯМЗ-238НД5	Динамическая составляющая энергозатрат $\dot{Y}^i(\omega)$, кДж/с ² в зависимости от жесткости подвеса				Суммарные энергозатраты $\dot{Y}_{\Sigma}^i$, кДж/с ² в зависимости от жесткости подвеса			
	c_1 , кН/м				c_1 , кН/м			
	1500	1300	1100	900	1500	1300	1100	900
Штатная	237	220	201	180	2423	2406	2386	2366
Эффективно используемая регулярная составляющая энергии $\dot{Y}_a^i = \dot{Y}_{\Sigma}^i - \dot{Y}^i(\omega)$					2186			

Результаты исследования.

Перечисленными аналитическими выражениями (1-9) учтены основные соотношения между энергозатратами, нагрузочным и скоростным режимами, а также частотными характеристиками МТА и двигателя. Использование ТЭК функционирования лесохозяйственного МТА на разных режимах позволяет установить соответствие масс и скоростей рабочих органов не только характеру выполняемых технологических операций, но и частотным характеристикам двигателя, что крайне важно при определении квазиоптимальных параметров МТА, обеспечивающих высокую производительность, снижение динамической нагруженности и энергозатрат при неустановившихся режимах функционирования.

Заклучение.

Разработанная модель позволяет выявить на стадии проектирования агрегатов лесохозяйственного МТА конструктивные параметры, позволяющие снизить энергозатраты и расход углеводородного топлива.

При штатной жесткости подвеса $c_1 = 1500$ кН/м и комплектации дизеля суммарные энергозатраты составляют 2423 кДж/с², а энергозатраты на динамическую нагруженность МТА – 237 кДж/с² (табл. 1). Динамическая составляющая часового расхода топлива $B^i(\omega)$ при этом составляет 13,99 кг/ч, а фактический часовой расход топлива B_0^i равен 54,23 кг/ч.

Для дизельного двигателя ЯМЗ-238НД5 выявлена резонансная частота $\omega_c = 5,0$ с⁻¹, сопровождаемая повышенной динамической нагруженностью, энергозатратами и расходом топлива.

Для МТА на базе трактора К-744Р-05 с дизелем ЯМЗ-238НД5 разработаны и опробованы пути снижения установленных негативных закономерностей введением демпфирующих и корректирующих устройств в системы подрессоривания МТА, регулирования скорости и подачи масла к парам трения двигателя [5,9-11].

Библиографический список

1. *Шутов И.В., Маслаков Е.Л., Маркова И.А. и др.* Лесные плантации (ускоренное выращивание ели и сосны). – Москва: Лесная промышленность, 1984. – 248 с.
2. *Плантационное лесоводство* / под ред. И.В. Шутова. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 366 с.
3. *Шумаков В.С., Кураев В.Н.* Современные способы подготовки почв под лесные культуры. – Москва: Лесная промышленность, 1973. – 160 с.
4. *Корниенко П.П., Сериков Ю.М., Зинин В.Ф., Казаков В.И.* Механизация обработки почвы под лесные культуры. – Москва: Агропромиздат, 1987. – 247 с.
5. *Антипин В.П., Дурманов М.Я., Кариев Г.В.* Производительность, энергозатраты и ресурс машинно-тракторного агрегата. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 484 с.
6. *Лурье А.Б.* Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. – Ленинград: Колос, 1970. – 376 с.
7. *Горячкин В. П.* Собрание сочинений. – 2-е изд. – Москва: Колос, 1968. – Т. 1. – 720 с.
8. *Барский И.Б., Анилович В.Я., Кутьков Г.М.* Динамика трактора. – Москва: Машиностроение, 1973. – 280 с.
9. *Durmanov, M.Ya., Martynov, B.G., Spiridonov, S.V.* Energy and Fuel Consumption of Agricultural Aggregate // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2018), Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2019. – PP. 1601-1612.
10. *Antipin, V.P., Durmanov, M. Ya., Mikhailov, O.A.* Method to Reduce Oil Burning in Diesel Engine of Agricultural Machine and Tractor Unit. // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019), Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer, Cham, 2020. – PP. 313-323.

11. *Antipin, V.P., Durmanov, M. Ya., Mikhailov, O.A.* How the parameters of an agricultural machine and tractor unit affect the wear of friction pairs in a diesel engine when used for transport // *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020), Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Cham, 2021. – PP. 313-320.

12. *Крутов В.И., Данилов Ф.М., Кузьмик П.К. [и др.]*. Основы теории автоматического регулирования. – Москва: Машиностроение, 1984. – 368 с.

13. А.с. №353169. Стенд для испытания двигателя внутреннего сгорания и трансмиссии / В.П. Антипин, М.Я. Сущевский, Е.П. Табаков; опубл. 29.09.72. – Бюл. № 29, 1972.

12. А.с. № 364859. Способ испытания двигателя / В.П. Антипин, В.В. Свиткин, М.Я. Сущевский, Е.П. Табаков; опубл. 29.09.72. – Бюл. № 5, 1973.

15. *Кац А.А.* Автоматическое регулирование скорости двигателя внутреннего сгорания. – Ленинград: Машгиз, 1956. – 303 с.

16. *Деруссо П., Рой Р., Клоуз Ч.* Пространство состояний в теории управления. – Москва: Наука, 1970. – 620 с.

Сведения об авторах

ФИО	Дурманов Михаил Яковлевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5 литер У, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	3809-9956
e-mail	pslm218@yandex.ru

ФИО	Спиридонов Сергей Васильевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5 литер У, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	9649-6007
e-mail	svslta@yandex.ru

Аннотация

Технико-экономические критерии (ТЭК) функционирования машинно-тракторного агрегата (МТА) – это система комплексных показателей качества проектирования трактора и агрегатируемых с ним механизмов для проведения полного спектра лесохозяйственных работ. Касательная сила тяги совместно с часовым расходом топлива дизеля являются определяющими факторами эксплуатационной и экономической эффективности использования лесохозяйственного МТА и определяют стоимость лесохозяйственных работ и стоимость обработки 1 га почвы. В статье рассматривается пахотный режим работы трактора «Кировец» К-744Р-05 с плугом ПУН-8-40 на тяжелых почвах. Для указанного режима определены энергозатраты МТА и часовой расход топлива дизеля ЯМЗ-238НД5 в штатной комплектации.

Ключевые слова: технико-экономический критерий, машинно-тракторный агрегат, энергозатраты, касательная сила, часовой расход топлива, амплитудно-частотная характеристика

УДК 630*375.4

Разделы рубрикатора ГРНТИ: 55.01.77; 55.42.03; 55.57.29; 68.01.77; 68.29.15; 68.85.29

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ ТУРБИН И ДВИГАТЕЛЕЙ

Куттеева М.А., Чураков А.В.

Введение.

Современное турбиностроение и двигателестроение требуют постоянного повышения эффективности, снижения веса и улучшения эксплуатационных характеристик. Глобальные тенденции акцентируют внимание на сокращении выбросов, росте КПД и увеличении ресурса силовых установок. Однако традиционные методы изготовления, такие как литье и механическая обработка, сталкиваются с ограничениями при создании сложных геометрических форм, приводя к высокой трудоемкости и значительным материальным потерям. В этом контексте аддитивные технологии (3D-печать) представляют собой прорывное решение. Они

позволяют формировать детали сложнейшей конфигурации послойным наращиванием материала, предлагая новые возможности для проектирования и производства высокоточных компонентов турбин и двигателей.

Цель работы – исследовать возможности и оценить эффективность применения аддитивных технологий для изготовления высокоточных компонентов турбин и двигателей.

Методы исследования.

Анализ существующих литературных источников по применению аддитивных технологий в производстве компонентов турбин и двигателей. На основе полученной информации выполнена систематизация и классификация данных о различных технологиях 3D-печати, используемых материалах и типах изготавливаемых компонентов.

Результаты исследования.

Среди всего многообразия методов аддитивного производства для изготовления ответственных деталей турбин наибольшее распространение получили технологии селективного плавления в слое порошка, а именно селективное лазерное плавление и электронно-лучевое плавление. Селективное лазерное плавление использует мощный волоконный лазер для расплавления металлического порошка, наносимого тонкими слоями толщиной от 20 до 50 микрон [1]. Данный метод обеспечивает высокую точность геометрии и хорошее качество поверхности, что критически важно для деталей проточной части двигателя, таких как лопатки турбины и сопловые аппараты [2]. Электронно-лучевое плавление, осуществляемое в вакууме, позволяет снизить внутренние напряжения в материале и обладает более высокой производительностью, что делает его предпочтительным для изготовления крупногабаритных деталей, например, корпусных элементов и дисков.

Одним из главных преимуществ аддитивных технологий является возможность реализации так называемой топологической оптимизации. В отличие от традиционного проектирования, где инженер ограничен технологией литья или доступом инструмента при фрезеровании, топологическая оптимизация позволяет создать конструкцию, в точности повторяющую траектории силовых потоков. Материал размещается только там, где он действительно необходим для восприятия нагрузки, а все остальное удаляется. Применительно к двигателестроению это дает феноменальный результат: масса вспомогательных элементов, таких как кронштейны крепления агрегатов, может быть снижена на 40-60 процентов без потери прочностных характеристик. Ярким примером служит

модернизация кронштейна для двигателя LEAP компании GE, масса которого была уменьшена с двух килограммов до всего лишь трехсот граммов.

Однако наиболее впечатляющие результаты достигнуты в области производства лопаток турбин и топливных форсунок [3]. Лопатки работают в экстремальных условиях, при температурах, превышающих температуру плавления материала, поэтому их защита осуществляется за счет сложных внутренних каналов, по которым прокачивается охлаждающий воздух, и тысяч микроскопических отверстий на поверхности, создающих охлаждающую пленку. Традиционное литье с использованием керамических стержней крайне трудоемко и ограничено в геометрии. Селективное лазерное плавление позволяет формировать эти каналы любой конфигурации, включая извилистые трассы и завихрители, непосредственно в процессе выращивания детали. Это повышает эффективность охлаждения на 15-20 процентов, что напрямую влияет на ресурс лопатки и позволяет поднять температуру газа на входе в турбину, увеличивая общий КПД двигателя.

Наиболее показательным примером триумфа аддитивных технологий в авиационном двигателестроении является топливная форсунка для двигателя LEAP американской корпорации GE Aviation. До внедрения 3D-печати эта форсунка представляла собой сложную сборную конструкцию, состоящую из двадцати отдельных компонентов, соединенных между собой пайкой и сваркой. Каждое такое соединение являлось потенциальным источником отказа под воздействием высоких температур и вибраций, а сам процесс сборки был трудоемким и требовал многоступенчатого контроля качества.

Применение метода селективного лазерного плавления позволило радикально изменить конструкцию. Благодаря возможностям топологической оптимизации и послойного синтеза, инженерам удалось объединить все двадцать элементов в единую монолитную деталь, напечатанную из жаропрочного никелевого сплава Inconel 718. Интеграция сложных внутренних каналов смешения топлива с воздухом, которые ранее требовали механической обработки и последующей сборки, была реализована непосредственно в процессе выращивания детали. Результат превзошел ожидания: прочность форсунки увеличилась в пять раз благодаря отсутствию сварных швов — наиболее уязвимых мест конструкции, а масса изделия снизилась на 25 процентов.

Однако самым важным итогом стало не столько улучшение тактико-технических характеристик, сколько доказательство пригодности метода для

крупносерийного производства. На сегодняшний день выпущено уже более ста тысяч таких форсунок [4]. Этот масштаб позволяет сделать однозначный вывод об экономической эффективности: несмотря на более высокую стоимость единицы оборудования и порошкового материала, исключение сборочных операций, сокращение складских запасов, комплектующих и резкое снижение процента брака по причине негерметичности швов обеспечили снижение общей себестоимости изделия. Таким образом, форсунка двигателя LEAP стала символом новой индустриальной эпохи, доказав, что аддитивные технологии способны не только создавать опытные образцы, но и конкурировать с традиционным производством в масштабах мировой авиационной промышленности. Важным направлением является также применение аддитивных технологий для ремонта и восстановления дорогостоящих компонентов. Метод прямого лазерного выращивания позволяет наплавлять металл на локально поврежденные участки дисков турбин или кромки лопаток, которые подверглись эрозии [5]. Вместо выбраковки и замены целого узла стоимостью в миллионы рублей, деталь возвращается в эксплуатацию после наплавки и последующей механической обработки, что значительно продлевает ее жизненный цикл.

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение аддитивных технологий в турбостроение сопряжено с рядом серьезных технологических вызовов. Прежде всего, это качество поверхности: после печати шероховатость поверхности составляет от 6 до 20 микрон, что выше требований к аэродинамике проточной части. Детали требуют обязательной финишной обработки, включающей пескоструйную очистку, шлифовку, а в случае сложных внутренних каналов — химическое полирование. Второй проблемой являются остаточные напряжения, возникающие из-за локального теплового воздействия лазера. Без правильной термической обработки, а именно вакуумного отжига, деталь может деформироваться. Для ответственных деталей, работающих под высокими нагрузками, обязательным этапом становится горячее изостатическое прессование, которое позволяет «залечить» микропоры и обеспечить стопроцентную плотность материала. Наконец, контроль качества таких деталей требует применения современных методов неразрушающего контроля, таких как промышленная компьютерная томография, позволяющая заглянуть внутрь детали и проверить целостность сложных внутренних каналов, недоступных для обычных методов дефектоскопии.

Заключение.

Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что применение аддитивных технологий для создания компонентов турбин и двигателей

перешло из экспериментальной стадии в стадию реального промышленного внедрения. Сегодня это не просто способ изготовления опытных образцов, а полноценный производственный метод, позволяющий создавать детали с уникальными свойствами, недостижимыми при использовании традиционных технологий. Аддитивное производство обеспечивает снижение веса конструкций, повышение эффективности охлаждения горячих узлов, сокращение сроков разработки и экономию дорогостоящих материалов. Дальнейшее развитие отрасли будет неразрывно связано с совершенствованием порошковых материалов, увеличением размеров рабочих камер промышленных 3D-принтеров и автоматизацией процессов постобработки. В ближайшее десятилетие доля деталей, выращенных послойно, в авиационных и энергетических газотурбинных двигателях будет неуклонно расти, открывая путь к созданию силовых установок нового поколения с беспрецедентными характеристиками.

Библиографический список

1. Аддитивные технологии. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B4%D0%B4%D0%B8%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D0%B8 (дата обращения 01.03.2026).
2. Аддитивные технологии в нефтегазе: будущее уже наступило? URL: [https:// nprom.online/technology/additivnye-tehnologii-v-neftegaze-np1-26/](https://nprom.online/technology/additivnye-tehnologii-v-neftegaze-np1-26/) (дата обращения 01.03.2026).
3. Магеррамова Л.А., Ножницкий Ю.А., Васильев Б.Е., Кинзбурский В.С. Применение аддитивных технологий для изготовления деталей перспективных газотурбинных двигателей // Технология легких сплавов, 2015. – № 4. – С. 7-12.
4. Аддитивная фабрика GE Aviation пробила отметку в тридцать тысяч 3D-печатных топливных форсунок. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/additive-factory-ge-aviation-broke-the-mark-of-thirty-thousand-3dprint> (дата обращения 02.03.2025)
5. Федоров В.Б. Актуальность метода прямого лазерного выращивания в аддитивном производстве. Технологии обработки // International Journal of Humanities and Natural Sciences, 2024. – Vol. 4-5 (91). – С. 152-156.

Сведения об авторах

ФИО	Куттueva Мария Александровна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	mkuttueva@yandex.ru

ФИО	Чураков Андрей Владимирович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	9526-9599
e-mail	sheff_2.01@mail.ru

Аннотация

В статье рассматриваются современные возможности и перспективы внедрения аддитивных технологий в производство газотурбинных двигателей и энергетических установок. Выполнен анализ основных методов 3D-печати металлами, применимых для изготовления жаропрочных компонентов. Особое внимание уделяется вопросам точности, микроструктуры материалов и экономической эффективности перехода от традиционного литья к послойному синтезу. Приведены примеры успешной реализации аддитивных деталей в серийных двигателях ведущих мировых производителей.

Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное лазерное плавление, газотурбинный двигатель, жаропрочные сплавы, топологическая оптимизация, системы охлаждения.

УДК 621.7.04

Разделы рубрикатора ГРНТИ 55.42.49

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЕСНОГО ДВИЖИТЕЛЯ ЛЕСНЫХ МАШИН В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ

Михайлов О.А.

Введение.

По некоторым данным в Российской Федерации порядка 67% леса произрастает на грунтах с низкой несущей способностью. Поэтому традиционно лесозаготовительные работы в основном проводятся зимой при низких отрицательных температурах и значительном снежном покрове. Толщина снежного покрова может превышать один метр, при этом снег под воздействием колесных движителей лесосечных машин уплотняется, что вызывает заметное изменение его механических свойств.

В предыдущих работах рассматривались вопросы связанные только со сжатием снега под воздействием колесного движителя лесосечных машин. Но для составления корректной математической модели взаимодействия колесного движителя со снегом необходимо проанализировать свойства опорной поверхности и их изменение при уплотнении

Для составления корректной математической модели взаимодействия движителя со снегом проанализируем свойства опорной поверхности и их изменение при уплотнении. Обратимся к сведениям о физико-механических свойствах снега. В работе [1] представлены формулы, связывающие модуль деформации E [МПа], удельное сцепление C_0 [МПа], угол внутреннего трения φ [°] и коэффициент трения резины о снег $\varphi_{тр}$ с его удельным весом γ [МН/м³] и температурой T [°C]. Зависимости указанных свойств от удельного веса имеют степенной характер, причем коэффициенты в уравнениях изменяются в зависимости от температуры.

Ранее в работе [2] приводилась математическая зависимость позволяющая определять сжатие деформируемого снежного массива под воздействием колесного движителя, однако общая деформация массива состоит не только из сжатия, но и из сдвига слоев снега [2].

Цель работы – получить зависимости позволяющие составить корректную математическую модель взаимодействия движителя лесосечных машин со снежным покровом на лесосеке

Результаты исследования.

В работе [2] приводится уравнение позволяющее определять сжатие деформируемого снежного массива под воздействием колесного движителя, однако общая деформация массива состоит не только из сжатия, но и из

сдвига слоев снега. Как было отмечено ранее [2], деформации сдвига стремительно развиваются по мере приближения давления p несущей способности q_z , увеличивая общую деформацию h_f . Это явление принято учитывать при расчете общей деформации следующим образом [1,3]:

$$h_f = \frac{q_z}{q_z - p} h \quad (1)$$

В исследуемой задаче деформируемый снежный массив находится на жестком основании – мерзлом грунте, влияние которого увеличивает несущую способность снега. При определении несущей способности массивов ограниченной толщины принято пользоваться двумя величинами: несущей способностью массива неограниченной толщины и коэффициентом учета влияния близлежащего жесткого слоя. Воспользуемся предельным давлением p_z в качестве аналога несущей способности снежного массива неограниченной толщины, тогда [1,3]:

$$q_z = p_z \alpha_H, \quad (2)$$

где α_H – коэффициент учета влияния близлежащего жесткого основания.

Предельное давление p_z зависит от плотности снега [2].

Перепишем уравнение из [2], выразив ρ через ρ_0 и ε :

$$p_z = a_{p_z} \left(\frac{\rho_0}{1 - \varepsilon} \right)^{b_{p_z}}, \quad (3)$$

или:

$$p_z = p_{z0} \left(\frac{1}{1 - \varepsilon} \right)^{b_{p_z}}, \quad (4)$$

где p_{z0} - предельное давление по нормали при $\rho = \rho_0$.

Кроме того, относительная деформация массива ε связана со сжатием:

$$\varepsilon = \frac{h}{H}. \quad (5)$$

Коэффициент повышения несущей способности за счет уменьшения толщины деформируемого слоя под воздействием движителя рассчитаем по уравнению:

$$\alpha_H = 1 + \frac{1}{2 p_{z0}} p \quad (6)$$

После подстановки в уравнение (1) выражений, описывающих сжатие снега [2], запишем:

$$h_f = \frac{\alpha p_{z0} ((1-\chi p)pC+1)^{b_{pz}}}{\alpha p_{z0} ((1-\chi p)pC+1)^{b_{pz}} - p} \cdot \frac{(1-\chi p)pC}{1+(1-\chi p)pC} H, \quad (7)$$

$$h_f = \frac{(p+2p_{z0})((1-\chi p)pC+1)^{b_{pz}}}{(p+2p_{z0})((1-\chi p)pC+1)^{b_{pz}} - 2p} \cdot \frac{(1-\chi p)pC}{1+(1-\chi p)pC} H. \quad (8)$$

Уравнение (8) позволяет определить фактическую глубину колеи в зависимости от физико-механических свойств снежного массива, давления со стороны движителя и геометрических параметров пятна контакта с учетом упрочнения снега под воздействием колесного движителя.

Силу сопротивления движителю со стороны деформируемого снега определим как интеграл [1,3]:

$$F_r = B \int_0^{h_f} p dh_f. \quad (9)$$

Воспользуемся формулой взятия определенного интеграла по частям, при этом учтем, что переменные h_f и p зависят друг от друга:

$$F_r = B \int_0^{h_f} p dh_f = B h_f p \Big|_0^p - B \int_0^p h_f dp. \quad (10)$$

Для взятия интеграла представим подынтегральную функцию в (10) в виде полинома Тейлора:

$$h_f = \frac{p_{z0} ((1-\chi p)pC+1)^{b_{pz}}}{p_{z0} ((1-\chi p)pC+1)^{b_{pz}} - p} \cdot \frac{(1-\chi p)pC}{1+(1-\chi p)pC} H = q \approx \sum_{n=1}^k \frac{q^n}{n!} p^n \approx \sum_{n=1}^k \zeta_n p^n, \quad (11)$$

где q^n – производная функции q порядка n по p в точке 0, коэффициенты ζ_n при p^n .

$$\zeta_1 = CH,$$

$$\zeta_2 = \frac{CH}{p_{z0}} \{1 - p_{z0}(C - \chi)\}, \quad (12)$$

$$\zeta_3 = \frac{CH}{p_{z0}^2} \left\{ \frac{1}{2} + Cp_{z0}^2(C - 2\chi) - p_{z0}((b_{pz} + 1)C - \chi) \right\},$$

...

Тогда запишем уравнение (9) таким образом:

$$F_r \approx B \cdot \left(h_f p - \sum_{n=1}^k \zeta_n \int_0^p p^n dp \right). \quad (13)$$

Определенные интегралы от степеней n давления p по формуле (13):

$$\xi_1 = \frac{1}{2} p^2,$$

$$\xi_2 = \frac{1}{3} p^3, \quad (14)$$

$$\xi_3 = \frac{1}{4} p^4,$$

...

Расчеты, выполненные в тех же диапазонах варьирования исходных данных, что и ранее, показывают, что в формуле (13) можем без существенной потери точности принять $k = 2$, тогда:

$$F_r = B C H p^2 \left(\frac{-(p + 2p_{z0})(1 + C\chi p^2 - (C + 2\chi)p)(1 + (p - \chi p^2)C)^{b_{pz}} + 2C\chi p^3 - 2Cp^2 - 2p}{2(C\chi p^2 - Cp - 1)((p + 2p_{z0})(1 + (p - \chi p^2)C)^{b_{pz}} - 2p)} \right) \quad (15)$$

Сила сцепления движителя с опорной поверхностью определится как сумма двух составляющих – силы трения резины о снег F_{mp} и сопротивления снега сдвиговой деформации F_t [1,3]:

$$F_T = F_{mp} + F_\tau = \varphi_{mp} G_w + B \int_0^L \tau dx, \quad (16)$$

где G_w – нагрузка на движитель; τ – напряжение сдвига; x – горизонтальная координата, отсчитываемая от начала пятна контакта движителя с опорной поверхностью.

Функцию напряжение сдвига определим, воспользовавшись известным уравнением для расчета деформации сдвига [1,3]:

$$j = \frac{\tau}{G} t_\epsilon \cdot \frac{\tau_{\max}}{\tau_{\max} - \tau}, \quad (17)$$

где τ – сдвиговое напряжение; $\tau_{\max}$ – максимальное сопротивление сдвигу; t_ϵ – шаг грунтозацепов; G – модуль сдвига.

Выразим τ из уравнения (17) [1,3]:

$$\tau = \frac{jG\tau_{\max}}{jG + t_\epsilon \tau_{\max}}. \quad (18)$$

При этом деформация сдвига связана с коэффициентом буксования уравнением [1,3]:

$$j = Sx, \quad (19)$$

где S – коэффициент буксования.

Максимальное сопротивление сдвигу определим по зависимости [1], [3]:

$$\tau_{\max} = p \operatorname{tg} \varphi + C_0 \left(1 - \frac{j}{t_\epsilon} \right). \quad (20)$$

Интегрирование выражения по формуле (16) с учетом выражений (18) – (20) приводит к следующему уравнению для F_T :

$$F_T = \varphi_{mp} G_w + \frac{BG^2 L(p \operatorname{tg} \varphi + C_0)}{(G - C_0)^2} - S \cdot \frac{BC_0 GL^2}{2t_z(G - C_0)} - \frac{1}{S} \cdot \frac{(p \operatorname{tg} \varphi + C_0)^2 BG^2 t_z}{(G - C_0)^3} \ln \left(1 + S \frac{L(G - C_0)}{t_z(p \operatorname{tg} \varphi + C_0)} \right). \quad (21)$$

Величина угла внутреннего трения φ зависит от плотности снега. Модуль сдвига снега G [МПа] определим в зависимости от плотности ρ [г/см³] по уравнению [4]:

$$G = 0,29\rho. \quad (22)$$

В уравнениях [2] и (22) плотность следует определять по уравнениям [2] и (5) поскольку сцепление определяется при взаимодействии движителя с уже уплотненным снегом.

Заключение

По результатам исследований получены формулы для расчета глубины колеи (8), образующейся под воздействием колесного движителя лесной машины, силы сопротивления (15) и силы сцепления движителя с опорной поверхностью (21). Аналитические зависимости получены на основе решения задачи о вдавливании штампа в упрочняющуюся среду, механические свойства которой являются степенными функциями плотности среды, изменяющейся под воздействием штампа.

Библиографический список

1. Ларин В.В. Методы прогнозирования и повышения опорной проходимости многоосных колесных машин на местности: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Москва: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2007
2. Тарадин Г.С. Исследование колееобразования и тягово-сцепных свойств движителей колесных лесных машин при работе на заснеженных лесосеках: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, 2020. – 115 с.
3. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. – Москва: Машиностроение, 1981. – 232 с.
4. Лухминский В.А. Совершенствование моделей и методов прогнозирования проходимости гусеничных лесных машин: диссертация на

соискание ученой степени кандидата технических наук. – Архангельск: САФУ, 2018. – 179 с.

Сведения об авторах

ФИО	Михайлов Олег Андреевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт- Петербург, Россия
SPIN-код	4681- 4898
e-mail	kerro07@mail.ru

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы, связанные с получением математических моделей образования колеи, сопротивления перемещению и сцепления колесного движителя лесосечных машин на снегу. Аналитические зависимости получены на основе решения задачи о вдавливании штампа в упрочняющуюся среду, механические свойства которой являются степенными функциями плотности среды, изменяющейся под воздействием штампа.

Ключевые слова: колесный движитель, трелевочный трактор, лесосека, снежный массив, математическая модель.

УДК 630*3

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.15.19

ОСОБЕННОСТИ УЧЕТА СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ТРЕЛЕВОЧНЫХ ТРАКТОРОВ НА ЛЕСОСЕКЕ

Михайлов О.А.

Введение.

Обычно при исследовании работы гусеничных тракторов учитывают силу сопротивления качению. Специфика работы трелевочных тракторов показывает, что такой подход в оценке их тягово-сцепных свойств

необъективен. У трелевочного трактора часть пачки леса перемещается за трактором в полупогруженном положении, что оказывает дополнительное сопротивление от волочащийся пачки леса. Кроме этого трелевочный трактор при работе на лесосеке практически постоянно находится в режиме поворота. Как показывают экспериментальные исследования на полигоне-волоке Онежского тракторного завода, 70-80 % времени трелевочный трактор, в той или иной степени находится в режиме поворота [1,2]. То есть оператор постоянно воздействует на механизм поворота. И это не зависит от конструкции самого механизма поворота. Это относится как к фрикционным, так и к планетарным механизмам.

Еще одна особенность лесозаготовок заключается в том, что лесосеки как правило не имеют абсолютно горизонтальный рельеф, а имеют продольные и боковые уклоны волока.

Следовательно, специфика и особенности работы различных лесосечных машин значительно отличаются от условий работы сельскохозяйственных и промышленных гусеничных и колесных тракторов. В работах [1,2] предложена методика получения обобщенного закона распределения свойств трелевочного волока формируемого тремя факторами. Это следующие силы сопротивления: 1) сила, обусловленная качением тягача и скольжением пачки леса, 2) сила, возникающая вследствие продольных уклонов волока, и 3) сила, противодействующая повороту транспортной системы. В этих работах не учитывались боковые уклоны волока.

Цель работы – получить обобщенный закон распределения свойств трелевочного волока, учитывающего четыре фактора.

Методы исследования.

В настоящей работе исследована методика отыскания плотности распределения сумм независимых случайных величин.

Результаты исследования.

Эксплуатационные режимы трелевочных тракторов определяются как результат совместного воздействия различных факторов описываемыми случайными величинами - силами сопротивления разной природы $X_1, \dots, X_m$, которые в первом приближении можно считать независимыми случайными величинами [1,2]. Таким образом, закон распределения свойств трелевочного волока определяется функцией плотности распределения $f_x(x)$, где

$$X = X_1 + \dots + X_m \quad (1)$$

Неизвестную плотность распределения $f_x(x)$ удобно отыскивать в терминах нормированной случайной величины:

$$Y = \frac{X-\alpha}{\sigma}; \alpha = MX; \sigma = \sqrt{DX} \quad (2)$$

где MX и DX соответственно математическое ожидание и дисперсия случайной величины X . Используем метод эталонных функций [3] для вычисления плотности распределения $f_x(x)$, а именно, представим $f_x(x)$ в виде

$$f_x(x) = f_0(x) \sum_{n=0}^{\infty} c_n p_n(x) \quad (3)$$

Здесь $f_0(x)$ некоторая эталонная плотность вероятности и $p_0(x), p_1(x), \dots$ - система ортонормированных полиномов с весом $f_0(x)$. Традиционные методы учета случайных сил сопротивления основаны на использовании только нормальных законов распределения. В [2,4,5] изучались случайные сопротивления (1) при $m=3$, где X_1 - сила, обусловленная качением тягача и скольжением пачки леса, X_2 - сила, возникающая вследствие неровностей пути (продольные уклоны волока) и X_3 - сила, противодействующая повороту транспортной системы. Случайные силы сопротивления X_2 и X_3 описывались законами распределения Грама-Шарлье [3] с ненулевыми коэффициентами асимметрии. В [4-5] анализировались изменения режимов эксплуатации трелевочных тракторов, вызванных учетом указанных поправок к нормальному распределению на степень асимметрии.

Последние экспериментальные исследования, проводившиеся на полигоне-волоке Онежского тракторного завода, показывают, что значительное влияние на обобщенный закон распределения свойств трелевочного волока оказывает сила сопротивления, возникающая от боковых уклонов волока X_4 .

В настоящей работе дается методика отыскания плотности распределения сумм (1) независимых случайных величин, каждая из которых имеет произвольное распределение. В качестве весовой функции выберем

$$f_0(x) = (2\pi)^{-0,5} \exp(-0,5x^2) \quad (4)$$

Тогда разложение (3) примет вид [2]

$$f(x) = f_0(x) [1 + \sum_{n=3}^{\infty} c_n (n!)^{-1} H_n(x)] \quad (5)$$

Здесь $H_n(x)$ - полиномы Эрмита (ортгональные с весом (4)),

$$H_n(x) = (-1)^n \sqrt{2\pi} \exp(-0,5x^2) f_0^{(n)}(x), \quad (6)$$

в частности,

$$\begin{cases} H_0(x) = 1, H_1(x) = x, H_2(x) = x^2 - 1; \\ H_3(x) = x^3 - 3x. \end{cases} \quad (7)$$

В свою очередь, коэффициенты C_n ($n \geq 3$) вычисляются в терминах нормированных центральных моментов случайной величины X , в частности,

$$c_3 = \alpha_3, c_4 = \alpha_4 - 3, c_5 = \alpha_5 - 10\alpha_3, c_6 = \alpha_6 - 15\alpha_4 + 30, \quad (8)$$

где $\alpha_n = \mu_n \sigma^{-n}$ и μ_n - центральные моменты X.

Плотность распределения $f_x(x)$ находится методом характеристических функций Ляпунова, т.е. с помощью преобразования Фурье в комплексной форме и его обращения [6]. А именно, вводится характеристическая функция плотности $f_x(x)$

$$E_x(t) = M(e^{itx}) = \int_{-\infty}^{\infty} f_x(x) e^{itx} dx \quad (9)$$

Согласно [6], для нормированной нормальной случайной плотности распределения [4] находим

$$E_x(t) = \exp(-0,5t^2) \quad (10)$$

В свою очередь, используя соотношение [6]

$$E_{\sigma x+a}(t) = e^{iat} E_x(\sigma t) \quad (11)$$

и известный интеграл (α - любые, $\beta > 0$)

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(\alpha x - \beta^2 x^2) dx = \frac{\sqrt{\pi}}{\beta} \exp(0,25\alpha^2\beta^{-2}) \quad (12)$$

для плотности $f_{xk}(x)$ типа Грама-Шарлье [3] с параметрами a_k (математическое ожидание), σ_k (среднее квадратическое отклонение) и α_k (третий нормированный центральный момент) находим [2]

$$E_{x_k}(t) = E(t; a_k; \sigma_k) [1 + \frac{1}{6} \alpha_k \sigma_k^3 (it)^3] \quad , \quad (13)$$

где

$$E(t; a; \sigma) = \exp(iat - 0,5\sigma^2 t^2). \quad (14)$$

В силу основного свойства характеристической функции (9), примененному к сумме независимых случайных величин (1), получаем

$$E_x(t) = E_{x_1}(t) \dots E_{x_m}(t). \quad (15)$$

Формулы (13)-(15) дают

$$E_x(t) = E(t; a; \sigma) [1 + \frac{\alpha_1 \sigma_1^3 + \dots + \alpha_m \sigma_m^3}{3!} (it)^3 + \dots], \quad (16)$$

Выписанный член в квадратных скобках представляет собой главную часть характеристической функции искомой плотности распределения $f_x(x)$. Применяя обратное преобразование Фурье, получаем

$$f_x(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_x(t) e^{-itx} dt. \quad (17)$$

Из формул (16) и (17) находим

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma} f_0\left(\frac{x-a}{\sigma}\right) [1 + \frac{\alpha}{3!} H_3\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)], \quad (18)$$

где

$$\begin{cases} a = a_1 + \dots + a_m; \\ \sigma^2 = \sigma_1^2 + \dots + \sigma_m^2; \\ \alpha = \frac{\alpha_1 \sigma_1^3 + \dots + \alpha_m \sigma_m^3}{\sigma^3} \end{cases} \quad (19)$$

Здесь a_k , σ_k , α_k - параметры случайных сил сопротивления X_k , входящих в соотношение (1).

Проиллюстрируем влияние составляющей X_4 на обобщенный закон распределения свойств трелевочного волокна.

В примере рассмотренном в [2] свойства волокна определялись следующими коэффициентами сопротивления (безразмерными аналогами сил сопротивления):

- коэффициентом сопротивления движению трелевочной системы $X_1 = f_c$ с $a_1 = 0,200$; $\sigma_1 = 0,066$; $\alpha_1 = 0$;

- продольным уклоном волокна $X_2 = i$ с $a_2 = 0,003$; $\sigma_2 = 0,077$; $\alpha_2 = -0,020$;

- коэффициентом сопротивления повороту $X_3 = f_{\pi}$ с $a_3 = 0,020$; $\sigma_3 = 0,007$; $\alpha_3 = 0,038$;

Теперь учтем $X_4 = f_i$ с $a_4 = 0,015$; $\sigma_4 = 0,053$; $\alpha_4 = -0,010$.

Следовательно, обобщенный закон сопротивления описывается формулами (18) и (19):

$$\Psi = f_c + i + f_{\pi} + f_i. \quad (20)$$

На рис. 1 представлены плотности распределения суммарного коэффициента сопротивления и четырех его составляющих.

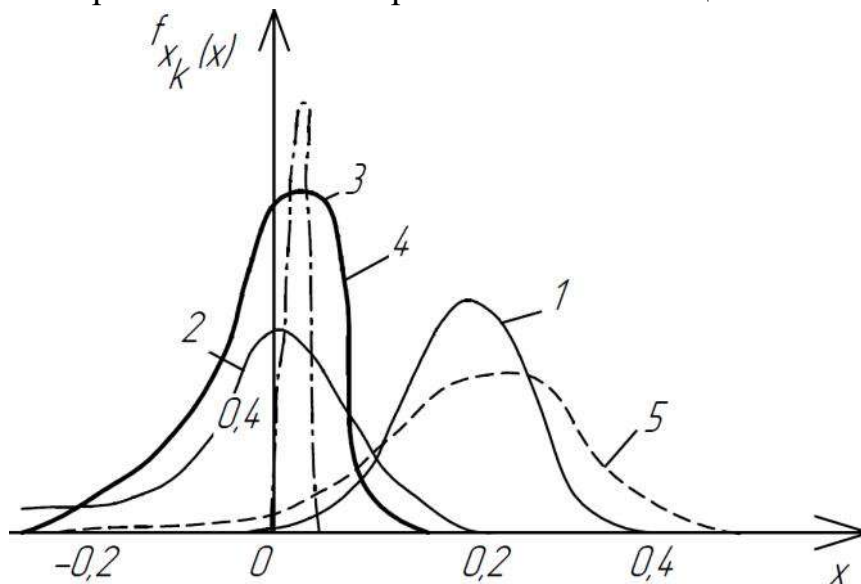


Рис. 1. Плотности распределения составляющих коэффициентов сопротивления:

- 1 - движения трелевочной системы; 2 - продольных уклонов волокна;
3 - поворота; 4 - боковых уклонов волокна; 5 - обобщенный закон распределения

Результаты расчетов ψ при $m = 3$ [2] и при $m = 4$ показывают, что составляющая f_i значительно влияет на плотность обобщенного закона распределения свойств трелевочного волокна даже при его малых боковых уклонах.

Заключение.

Таким образом, из данных экспериментов, проведенных на полигоне-волоке ОТЗ, следует учитывать составляющую f_i в представлении (20) для реальных производственных условий.

Библиографический список

1. Михайлов О.А. Улучшение тягово-скоростных свойств трелевочного трактора и снижение энергоемкости трелевки путем увеличения приспособляемости дизеля: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Ленинград: ЛТА, 1986. – 198 с.
2. Анисимов Г.М., Перельман А.Я., Михайлов О.А. Метод получения обобщенного закона распределения свойств трелевочного волокна // Повышение эксплуатационной эффективности машин для лесозаготовок и лесного хозяйства: межвузовский сборник научных трудов. – Ленинград: ЛТА, 1986. – С. 11–14.
3. Пугачев В.С. Теория случайных функций. – Москва: Физматиз, 1962. – 884 с.
4. Анисимов Г.М., Перельман А.Я., Михайлов О.А. Прогнозирование времени движения трелевочной системы на отдельных передачах // Изв. вузов. Лесной журнал, 1986. – №5. – С. 30–33.
5. Анисимов Г.М., Перельман А.Я., Михайлов О.А. Прогнозирование вероятности использования передаточных чисел трансмиссии трелевочного трактора // Тракторы и сельхозмашины, 1989. – №4. – С. 17–19.
6. Чистяков В.П. Курс теории вероятностей. – Москва: Агар, 1996. – 255 с.

Сведения об авторах

ФИО	Михайлов Олег Андреевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д.5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	4681 - 4898
e-mail	kerro07@mail.ru

Аннотация

В статье получена зависимость, из которой следует учитывать составляющую боковых уклонов волока при расчете обобщенного закона распределения параметров, определяющих свойства трелевочного волока. Экспериментальные исследования, проводившиеся на полигоне-волоке Онежского тракторного завода, показывают, что значительное влияние на обобщенный закон распределения свойств трелевочного волока оказывает сила сопротивления, возникающая от боковых уклонов волока.

Ключевые слова: лесосечная машина, обобщенный закон распределения, трелевочный трактор, боковой уклон волока.

УДК 630. 36. 003

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.15.19

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРЕЛЕВОЧНЫХ ТРАКТОРОВ НА ЛЕСОСЕКАХ С РЕЗКО ПЕРЕСЕЧЕННЫМ РЕЛЬЕФОМ

Михайлов О.А.

Введение.

Первым в мире специализированным гусеничным трелевочным трактором стал советский КТ-12 («Кировиц трелевочный») разработанный в 1946-1947 годах и запущенный в серию в 1948 году. До появления КТ-12 лес трелевали с помощью обычных сельскохозяйственных или промышленных тракторов или с помощью гужевой силы.

Прообразом создания макетного образца первого трелевочного трактора стал немецкий полноприводный гусеничный тягач RSO («Восток» или Porsche Typ175) разработанный фирмой «Порше» 1942 году, на основе советских тягачей СТЗ-5 и Сталинец-2.

То есть можно сказать, что в создание первого в мире трелевочного трактора были положены разработки советских ученых и конструкторов, создававших отечественные сельскохозяйственные и промышленные тракторы.

Следовательно, и разработка теории движения трелевочной системы базировалась на теории тракторов сельскохозяйственного и промышленного назначения. В дальнейшем, при создании колесных лесопромышленных тракторов и лесосечных машин использовалась теория движения автомобиля и колесных машин.

От степени обоснованности и достоверности расчетных схем и математического моделирования взаимодействия трелевочной системы с опорной поверхностью зависит качество теоретического исследования, достоверности прогнозирования рабочих режимов и эффективности работы трелевочных тракторов в различных производственных условиях.

Условия эксплуатации трелевочного трактора принципиально отличаются от условий движения тракторов сельскохозяйственного (с.-х.) назначения и автомобилей. Трактор с.-х. назначения в основном работает в равнинной местности или в местности со слабо пересеченным рельефом. Соответственно и теория его взаимодействия с почвой разрабатывалась без учета поперечного наклона (склона) поверхности. Автомобильные лесовозные дороги даже пятой категории (линии местного назначения и подъездные пути) имеют продольный наклон (уклон) оси не более $3...6^{\circ}$ [1]. Положением о лесосечных работах допускается работа трелевочных тракторов в летних условиях на уклонах и склонах до 24° . При этом трелевочный волок может иметь одновременно подъем (спуск) в продольной оси, а склон – в поперечной.

В учебниках и научно-производственной литературе рассматривается взаимодействие трелевочного трактора (да и лесосечных машин) только при движении на подъеме без учета склона волока (рис. 1а). Это серьезный недостаток теории движения трелевочного трактора. Такое упрощение не отражает сущность взаимодействия трелевочного трактора с волоком в реальных условиях эксплуатации, особенно гусеничного трактора, и недопустимо при моделировании процессов, возникающих в зоне контакта гусеницы с грунтом, с целью прогнозирования рабочих режимов. В основных регионах России лесозаготовки ведутся в условиях резко

пересеченного рельефа, когда трелевочный волок имеет склон в поперечной плоскости (рис. 1б).

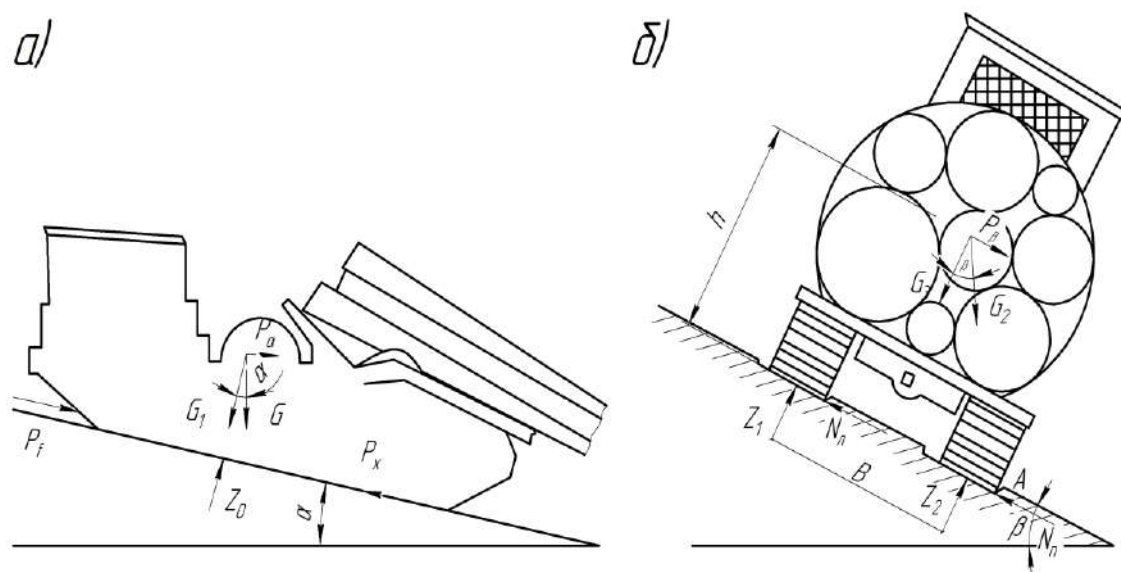


Рис. 1. Расчетная схема

Цель работы – повышение достоверности и обоснованности теории прогнозирования рабочих режимов трелевочных тракторов при эксплуатации их на лесосеках с резко пересеченным рельефом.

Рассмотрим некоторые особенности взаимодействия гусеничного движителя с опорной поверхностью при движении трелевочного трактора по горизонтальному участку волока и по волоку, проложенному по склону. При движении по горизонтальному участку волока весь вес трелевочного трактора и части пачки, размещенной на щите, воздействует на поверхность двух гусениц, площадь которых у тракторов ТДТ-55 составляет около 2.06 м^2 . При массе трактора 9300 кг среднее давление движителя на волок составит 45 кПа, а с пачкой массой 6000 кг – 57 кПа.

При движении трелевочного трактора по волоку с уклоном в поперечной плоскости 24° около 41% его веса будет воздействовать на стенки колеи и создавать реакции почвы N_L и N_P на торцевую часть гусеничных лент. Такое воздействие торцов гусениц с почвой сопровождается возникновением процессов, резко повышающих сопротивление движению трактора, уплотнение почвы и разрушение ее структуры. Составляющая веса трактора без пачки, движущегося по волоку с уклоном 24° будет $P_\beta = 37\text{ кН}$. При этом в зоне контакта торцов двух гусениц, площадь которых составляет всего 1500 см^2 , со стенками колеи возникает очень большое среднее давление 0,247 МПа. Это давление в 5.46

раза превышает давление, возникающее в зоне контакта опорной поверхности гусениц с горизонтальным волоком. Следует отметить, что максимальное давление гусеничного движителя на опорную поверхность может превышать среднее в 3...4 раза. Анализ сил, действующих на трактор (рис. 1б), показывает, что величина угла склона волока влияет на значение реакции почвы N_L и N_P . При схеме на рис. 1б торец правой гусеницы будет создавать в почве напряжения бóльших значений, чем торец левой гусеницы. Увеличение высоты центра масс за счет размещения на тракторе трелюемой пачки увеличит эту разницу напряжений в почве.

Результаты исследования.

Экологи, почвоведы, исследователи ходовых систем сельскохозяйственных машин и тракторов с почвой обосновали предельные значения давлений на почвы сельскохозяйственных угодий. Установлено, что при давлении более 50 кПа наблюдается переуплотнение почв сельскохозяйственных угодий и разрушение их структуры. Все это сопровождается резким снижением плодородия и урожайности. Движители, создающие давление 50 кПа и менее, можно считать «экологически совместимыми» с почвой. Следовательно, при воздействии торцевой поверхности гусеницы на стенку колеи в почве могут создаваться напряжения, в несколько раз превышающие «экологический предел», что, естественно, сопровождается интенсивным переуплотнением и разрушением структуры почвы. Экологический ущерб увеличивается от динамического воздействия торцевых элементов гусеницы на почву при движении их на стенки колеи. Сущность этого процесса практически не исследована.

Следующая особенность воздействия торцевой поверхности гусеницы с колесей (торцевое воздействие) — сопротивление движению трактора. Одним из главных требований, предъявляемых к опорной поверхности звена гусеницы, да и в целом гусеницы, - минимизация значений коэффициента сопротивления качению движителя по опорной поверхности, и цель достигнута.

При воздействии торца гусеницы на стенку колеи ее элементы не опираются на поверхность, а под очень большим давлением врезаются в почву. Вход в колею звеньев гусеницы и выход из нее сопровождается перемещением элементов торцевой поверхности гусеницы по стенке с разрушением и перемещением с большей скоростью частиц почвы. Можно априори утверждать, что коэффициент сопротивления движению по стенке колеи значительно выше коэффициента сопротивления качению гусеницы по волоку с нулевым углом склона. При движении гусеничного

трелевочного трактора по волоку с поперечным склоном $20...24^0$ сила сопротивления движению, возникающая под действием реакций N_L и N_P , может быть соизмерима с силой сопротивления качению гусеничного движителя по дну колеи.

Разработка теории прогнозирования рабочих режимов трелевочного трактора, эксплуатируемого на лесосеках с резко пересеченным рельефом, должна базироваться на смешанном законе распределения суммы всех составляющих сопротивления движению, для определения которых необходимо разработать методику и математические модели.

Заключение.

В современной теории воздействия трелевочного трактора с опорной поверхностью не учитывается влияние реакции почвы, возникающей от поперечного склона волока, на сопротивление движению трелевочной системы, уплотнение и разрушение структуры почвы.

В работе предложена и обоснована новая концепция взаимодействия движителя с волоком, позволяющая резко повысить достоверность прогнозирования рабочих режимов трелевочных тракторов, особенно при эксплуатации их в условиях пересеченного рельефа лесосеки.

Библиографический список

1. Сухопутный транспорт леса / под ред. д-ра техн. наук, проф. В.И. Алябьева. – Москва: Лесная промышленность, 1990. – 416 с.
2. Михайлов О.А. Улучшение тягово-скоростных свойств трелевочного трактора и снижение энергоемкости трелевки путем увеличения приспособляемости дизеля: дисс...канд. техн. наук. – Ленинград: ЛТА, 1986. – 198 с.
3. Анисимов Г.М., Перельман А.Я., Михайлов О.А. Метод получения обобщенного закона распределения свойств трелевочного волока // Повышение эксплуатационной эффективности машин для лесозаготовок и лесного хозяйства: межвузовский сборник научных трудов. – Ленинград: ЛТА, 1986. – С. 11-14.

Сведения об авторах

ФИО	Михайлов Олег Андреевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д.5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	4681 - 4898
e-mail	kerro07@mail.ru

Аннотация

В статье приводится теория прогнозирования рабочих режимов трелевочного трактора, эксплуатируемого на лесосеках с резко пересеченным рельефом, которая базируется на смешанном законе распределения суммы всех составляющих сопротивления движению. Обобщенный закон распределения свойств трелевочного волока складывается из четырех плотностей распределения коэффициентов сопротивления.

Ключевые слова: Лесной волок, трелевочный трактор, поперечный наклон волока, реакция почвы.

УДК 630. 36. 003

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.15.19

ПРИМЕР ВЫБОРА КАНАТА, БЛОКОВ И КРЮКА ТИПОВОГО МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА

Стрельцов С.В., Охупкин Т.А., Власов Е.Н.

Введение.

Подъемно-транспортные машины и механизмы находят широкое применение во многих отраслях промышленности, сельского и лесного хозяйства, всех видов транспорта. Подъемно-транспортные устройства являются основой комплексной механизации и автоматизации производственных процессов. От правильного выбора параметров этих машин зависит высокопродуктивная работа всего предприятия [1,2].

Цель работы – показать на конкретном примере методику расчета каната, блоков и выбор крюка механизма подъема, основного механизма подъемно-транспортной машины.

Методы исследования.

Выполнения требований Гостехнадзора к расчету элементов механизма подъема.

Результаты исследования.

Исходные данные для расчета:

Грузоподъемность механизма – 2900 кг.

Скорость подъема груза – 12 м/мин = 0,2 м/с.

Режим работы – Средний/Умеренный.

Высота подъема груза – 35 м.

Класс использования – 3200 ч.

Кратность полиспаста – 2.

Полиспаст одинарный.

Выбор каната.

Действительное усилие в канате P_k для одинарного полиспаста определяется по формуле [1,2]:

$$P_k = \frac{(m_{гр} + m_{кр}) * g}{a * i_{п} * \eta_{п}} = \frac{(m_{гр} + 0,02 * m_{гр}) * g}{a * i_{п} * \eta_{п}}, \quad (1)$$
$$P_k = \frac{(2900 + 0,02 * 2900) * 9,81}{1 * 2 * 0,98} = 14805.1 \text{ Н}$$

где $m_{гр}$ – масса поднимаемого груза, кг, $m_{гр} = 2900$ кг;

a – число одинарных полиспастов, $a = 1$;

$i_{п}$ – кратность полиспаста, $i_{п} = 2$;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

$\eta_{п}$ – КПД полиспаста.

$$\eta_{п} = \frac{1 - \eta_{бл}^{i_{п}}}{i_{п} * (1 - \eta_{бл})}, \quad (2)$$

где $\eta_{бл}$ – КПД блока, $\eta_{бл} = 0,96...0,98$.

$$\eta_{п} = \frac{1 - 0,97^2}{2 * (1 - 0,97)} = 0,98.$$

Рассчитываем разрывное усилие каната S_p по формуле:

$$S_p = P_k * k_3 \leq S_k,$$

$$S_p = 14805.1 * 4.0 = 59220.4 = 59.2 \text{ кН}$$

где k_3 – минимальный допускаемый коэффициент запаса прочности зависит от группы режима работы механизма (принимаем $k_3 = 4.00$ [3]). Группа режима работы механизма определяется по совокупности классов использования и нагружения механизма. В данном случае это М4 [4].

По расчетному разрывному усилию каната и маркировочной группе по временному сопротивлению разрыва 1764 МПа выбираем диаметр каната d_k [5].

$$d_k = 11 \text{ мм.}$$

Определение диаметров блоков и выбор профиля желоба.

Минимальные диаметры блоков и уравнильных блоков, огибаемый стальными канатами, определяются по формулам:

$$D_{\text{бл}} \geq h_1 * d, \quad (3)$$

$$D_{\text{бл}}^{\text{ур}} \geq h_2 * d. \quad (4)$$

$$D_{\text{бл}} \geq 18 * 11 = 198 \text{ мм,}$$

$$D_{\text{бл}}^{\text{ур}} \geq 14 * 11 = 154 \text{ мм.}$$

где d – диаметр каната, мм;

$D_{\text{бл}}, D_{\text{бл}}^{\text{ур}}$ – диаметры соответственно барабана, блока и уравнильного блока по средней линии навитого каната, мм;

h_1, h_2 – коэффициенты выбора диаметров соответственного блока и уравнильного блока (определяем по [3]).

Диаметр блока крюковой подвески по дну желоба:

$$D_{\text{бл}} = d_k * (e - 1). \quad (5)$$

$$D_{\text{бл}} = 11 * (25 - 1) = 264 \text{ мм.}$$

где d_k – диаметр каната, мм;

e – коэффициент, принимаемый в зависимости от типа грузоподъемной машины, вида привода и группы механизма по режиму работы (принимаем $e = 25$ по [3]).

Диаметр уравнильного блока полиспаста и отклоняющего блока принимается:

$$D_{\text{бл}}^{\text{ур}} \geq 0,8 * D_{\text{бл}} = 0,8 * 264 = 211,2 \text{ мм.}$$

По ГОСТ 6636–80 диаметр блоков и все последующие полученные в результате расчетов числовые значения линейных размеров округлим до стандартных:

$$D_{\text{бл}} = 280 \text{ мм},$$

$$D_{\text{бл}}^{\text{ур}} = 220 \text{ мм}.$$

Размеры и профиль желоба блока (рис. 1) выбираются по ГОСТу 24.191.05–82.

Диаметр блока по центру каната:

$$D_0 = D_{\text{бл}} + d_{\text{к}} = 280 + 11 = 291 \text{ мм}.$$

На рис.1 представлена конструкция блоков стальных по ОСТ 24.191.05–82.

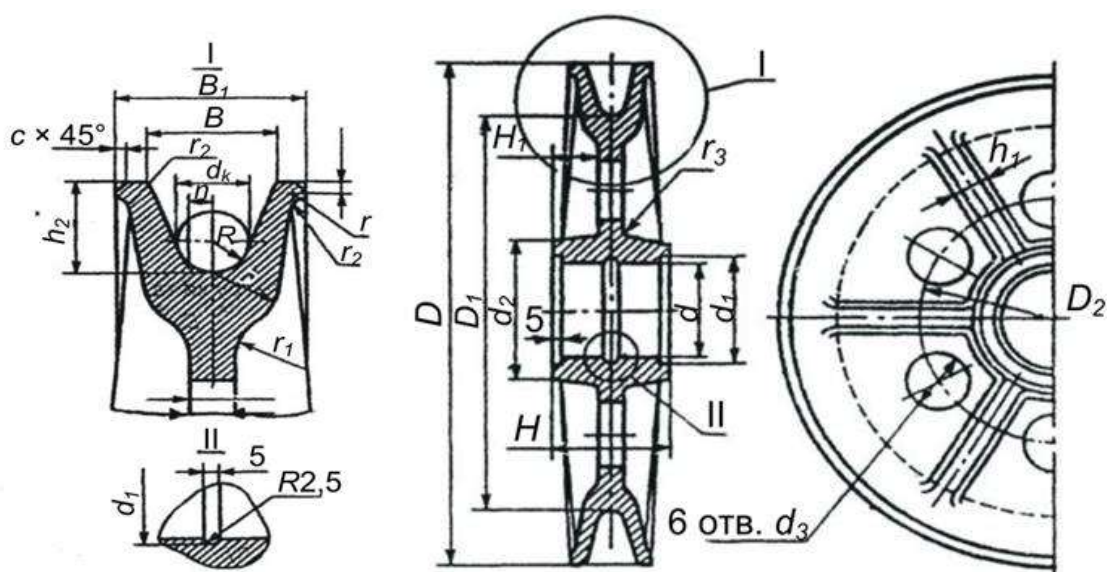


Рис. 1. Блоки стальные (ОСТ 24.191.05–82)

Выбор грузового крюка.

Выбор крюка производится в зависимости от типа крюковой подвески, грузоподъемности и группы режима работы механизма согласно ГОСТу 6627–74 на однорогие крюки [6] (рис. 2). Таким же образом производится и выбор замка грузового крюка [6] (рис. 3), служащего для предотвращения выпадения из зева крюка съёмных грузозахватных приспособлений.

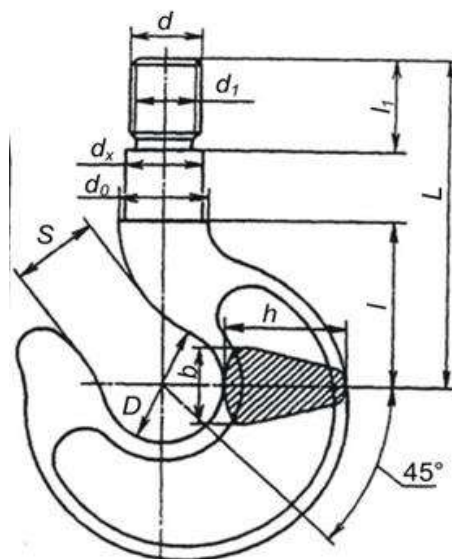


Рис. 2. Грузовой крюк

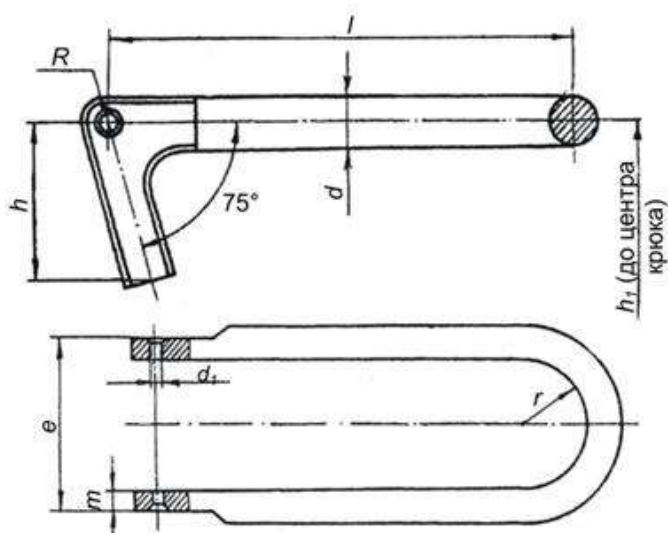


Рис. 3. Замок с отверстием в крюке

Заключение.

Все необходимые коэффициенты, входящие в формулы расчетов, определяются группой режима работы механизма. Определение отношения механизма к той или иной группе режима работы производится по классам нагружения и использования рассматриваемого механизма подъема.

Библиографический список

1. Справочник по кранам. Характеристики и конструктивные схемы кранов. Крановые механизмы, их детали узлы. Техническая эксплуатация

кранов / под общей редакцией д-ра техн, наук проф. М.М. Гохберга. – Москва: Машиностроение, 1988. – Т.2. – 559 с.

2. Справочник по кранам Т. 1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций / под общ. ред. М. М. Гохберга.— М.: Машиностроение, 1988. – Т. 1. – 559.

3. *Герасимов С.В., Долотов А.М., Кулаков Ю.Н.* Краткий справочник для расчета грузоподъемных машин. – Братск: БрГУ, 2009 – 103 с.

4. ГОСТ 25835-83 Краны грузоподъемные Классификация механизмов по режимам работы.

5. ГОСТ 2688-80. Канат двойной свивки типа ЛК-Р конструкции 6х19(1+6+6/6)+1о.с. Сортамент с Изменениями N1,2.

6. ГОСТ 6627-74. Крюки однорогие заготовки типы. конструкция и размеры.

Сведения об авторах

ФИО	Стрельцов Семен Викторович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д.5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	Отсутствует
e-mail	777sparta777@mail.ru

ФИО	Охалкин Тимофей Антонович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д.5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	Отсутствует
e-mail	okhapkin01@mail.ru

ФИО	Власов Евгений Николаевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д.5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	3785-3663
e-mail	vlasov-en@mail.ru

Аннотация

В статье приведен пример расчета каната, блоков и выбор крюка типового механизма подъема.

Ключевые слова: механизм подъема, канат, блок, крюк.

УДК 621

Раздел рубрикатора ГРНТИ 55.51.37

ПРИМЕР ВЫБОРА РЕДУКТОРА И ТОРМОЗА ТИПОВОГО МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА

Стрельцов С.В., Охапкин Т.А., Власов Е.Н.

Введение.

Подъемно-транспортные устройства являются основой комплексной механизации и автоматизации производственных процессов. От правильного выбора параметров этих машин зависит высокопродуктивная работа всего механизма.

Цель работы.

Показать на конкретном примере методику выбора редуктора и тормоза механизма подъема, основного механизма подъемно-транспортной машин.

Методы исследования.

При выполнении работы учтено выполнение требований Гостехнадзора к расчету элементов механизма подъема. Колодочный тормоз серии ТКТ.

Результаты исследования.

Исходные данные для расчета:

Грузоподъемность механизма – 2900 кг.

Скорость подъема – 12 м/мин = 0,2 м/с.

Режим работы – Средний/Умеренный.

Высота подъема груза – 35 м.

Класс использования – 3200 ч.

Кратность полистпаста – 2.

Электродвигатель МТФ 211-6:

- мощность на валу – 7,5 кВт;

- частота вращения вала – 930 об/мин;

- момент инерции – 0,46 кг*м².

Диаметр грузового барабана – 251 мм.

Выбор редуктора:

Найдем частоту вращения барабана:

$$n_6 = \frac{60 \cdot V_{гр} \cdot i_{п}}{\pi \cdot D_0}, \text{ об/мин,} \quad (1)$$
$$n_6 = \frac{60 \cdot 0,2 \cdot 2}{3,14 \cdot 0,251} = 30,4 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

Необходимое передаточное число:

$$U_p = \frac{n_{дв}}{n_6} = \frac{930}{30,4} = 30,6.$$

По каталогу на редукторы [1] выбираем редуктор с передаточным числом U_p , наиболее близким к расчетному. После проверяют отклонение передаточного числа редуктора:

$$\Delta U_p = \frac{(U_p - U_{\phi})}{U_{\phi}} \cdot 100 = \frac{(30,6 - 32,42)}{32,42} \cdot 100 = -5,61\% \leq \Delta U.$$

$$\Delta U = \pm 15\%.$$

Расчетный крутящий момент на тихоходном валу редуктора:

$$M_p = \frac{G \cdot D_0}{2 \cdot i_{п} \cdot \eta_{п} \cdot \eta_6} = \frac{(2900 \cdot 9,81) \cdot 0,251}{2 \cdot 2 \cdot 0,98 \cdot 0,98} = 1858,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Расчетный эквивалентный момент на тихоходном валу редуктора:

$$M_{\Sigma} = K_H \cdot M_p, \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2)$$

$$K_H = K_q \cdot K_t \leq 1. \quad (3)$$

$$K_q = \sqrt[3]{K_m} = \sqrt[3]{0,250} = 0,63.$$

$$K_t = \sqrt[3]{\frac{U_T \cdot N_H}{N_{HO}}}. \quad (4)$$

$$N_H = 60 \cdot n_T \cdot t_T = 60 \cdot 930 \cdot 3200 = 1,78 \cdot 10^8.$$

$$K_t = \sqrt[3]{\frac{32,42 \cdot 1,78 \cdot 10^8}{125 \cdot 10^6}} = 3,59.$$

$$K_H = 0,63 \cdot 3,59 = 2,26.$$

$$M_{\Sigma} = 2,26 \cdot 1858,8 = 4200,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$M_3 \leq M_H.$$

Заканчиваем все проверкой редуктора по общему межосевому расстоянию:

$$a_w \geq 0,5 * D_6 + b_{31}. \quad (5)$$

$$a_w \geq 0,5 * 240 + 157.$$

$$a_w \geq 277.$$

По найденным M_3 и a_w определяем по [1] подходящий редуктор:

- Редуктор Ц2-350, с частотой вращения ведущего вала 1000 об/мин.

Далее находим фактическую скорость подъема груза. Для этого:

1) Определим фактическую частоту вращения барабана:

$$n_6^\phi = \frac{n_{дв}}{U_\phi}, \text{ мин}^{-1}. \quad (6)$$

$$n_6^\phi = \frac{930}{32,42} = 28,7 \text{ мин}^{-1}.$$

2) Найдём скорость каната, навиваемого на барабан:

$$V_k = \frac{\pi * D_0 * n_6^\phi}{1000}, \text{ м/мин.} \quad (7)$$

$$V_k = \frac{3,14 * 251 * 28,7}{1000} = 22,6 \frac{\text{м}}{\text{мин}}.$$

3) Найдём фактическую скорость подъема груза:

$$V_\phi = \frac{V_k}{i_\pi}, \text{ м/мин.} \quad (8)$$

$$V_\phi = \frac{22,6}{2} = 11,3 \text{ м/мин.}$$

Проверим отклонения найденной скорости от заданного значения скорости подъема груза:

$$\Delta V = \frac{V_\phi - V}{V} * 100 \leq \Delta V = \pm 15\%. \quad (9)$$

$$\Delta V = \frac{11,3 - 12}{12} * 100 = -5,8\% \leq \pm 15\%.$$

Выбор тормоза (для группы режима работы М4 возможны тормоза серии ТКТ и ТКГ). Рассмотрим выбор тормоза серии ТКТ [2]. Расчетный тормозной момент должен быть $M_T \geq K_T * M_c$, Н*м, где K_T – коэффициент запаса торможения [2] $K_T = 1,75$; M_c – статический момент, приведенный к быстроходному валу редуктора:

$$M_c = \frac{G * D_{ш} * \eta}{2 * U_{факт} * i_\pi}, \text{ Н * м.} \quad (10)$$

$$M_c = \frac{2900 * 9,81 * 0,43 * 0,92}{2 * 32,42 * 2} = 86,8 \text{ Н} * \text{м}$$

$$M_T \geq 1,75 * 86,8 = 151,9 \text{ Н} * \text{м}.$$

Для механизма группы 4М с учетом диаметра и ширины тормозного шкива по величине тормозного момента по [2] выбираем колодочный тормоз ТКТ-200 (рис. 1,2).

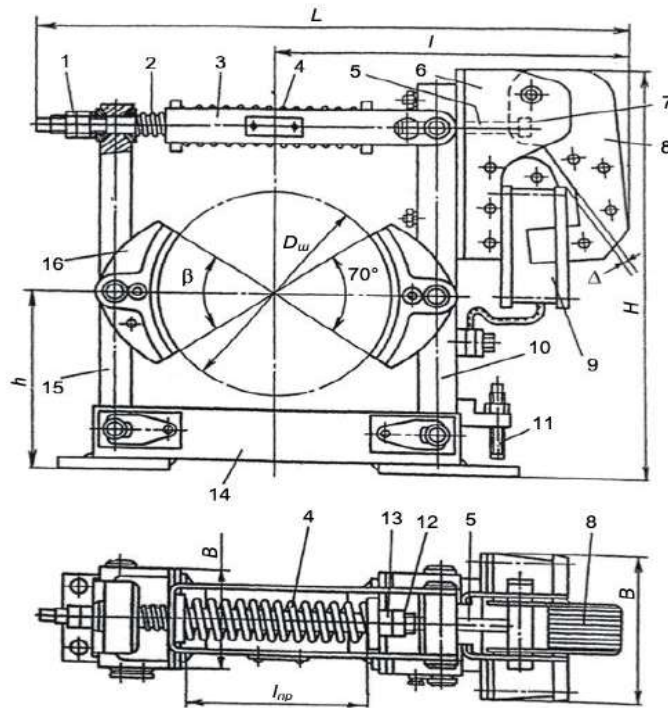


Рис. 1. Колодочный тормоз серии ТКТ

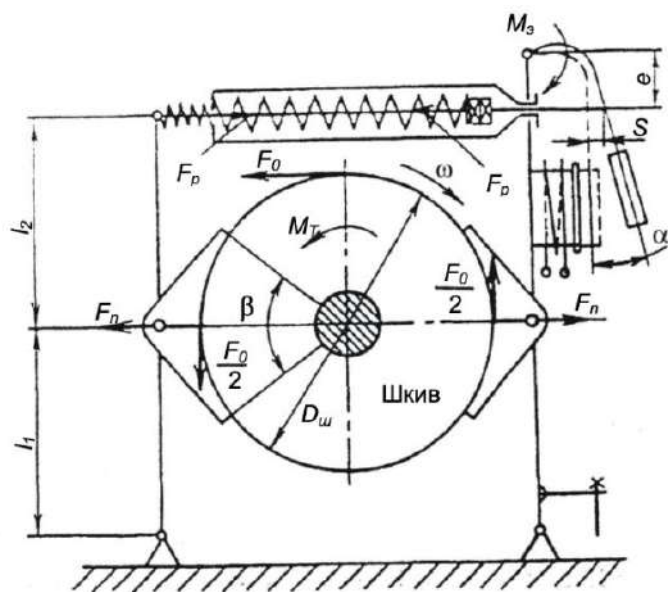


Рис. 2. Расчетная схема тормоза серии ТКТ

Выполним проверочный расчет тормоза:

1) Найдем окружное усилие на ободе тормозного шкива:

$$F_0 = \frac{2M_T}{D_{\text{ш}}}, \text{ Н}, \quad (11)$$

где $D_{\text{ш}}$ – диаметр тормозного шкива, м.

$$F_0 = \frac{2 * 151,9}{0,43} = 706 \text{ Н}.$$

2) Определим силу прижатия тормозных колодок:

$$F_{\text{п}} = \frac{F_0}{2f}, \text{ Н}, \quad (12)$$

где f – коэффициент трения между рабочими поверхностями тормозной ленты и шкива [3] $f = 0,1$).

$$F_{\text{п}} = \frac{706}{2 * 0,1} = 3530 \text{ Н}.$$

3) Найдем среднее давление между обкладкой и тормозным шкивом:

$$p = \frac{F_{\text{п}}}{A} < [p], \text{ Па}, \quad (13)$$

$$p = \frac{3530}{0,029} = 121724,1 \text{ Па} \approx 0,121 \text{ МПа} < 0,6 \text{ МПа}.$$

где $[p]$ – допускаемое удельное давление, $[p] = 0,6 \text{ МПа}$;

A – площадь касания обкладки со шкивом.

$$A = \frac{\pi * D_{\text{ш}} * B_{\text{к}} * \beta}{360^\circ}, \text{ м}^2. \quad (14)$$

$$A = \frac{3,14 * 0,42 * 0,09 * 90^\circ}{360^\circ} = 0,029 \text{ м}^2.$$

где $B_{\text{к}}$ – ширина обкладки;

β – угол сектора обхвата обкладкой шкива (принимается $\beta = 90^\circ$).

4) Далее определим усилия на концах рычагов:

$$F_{\text{р}} = \frac{F_{\text{п}} * l_1}{l_1 + l_2}, \text{ Н}, \quad (15)$$

где l_1 и l_2 – размеры рычага, м.

$$F_{\text{р}} = \frac{3530 * 0,135}{0,135 + 0,170} = 1562,46 \text{ Н}.$$

5) Находим расчетное усилие пружины:

$$F_{\text{ПР}} = 1,1 * F_{\text{р}}, \text{ Н}. \quad (16)$$

$$F_{\text{ПР}} = 1,1 * 1562,46 = 1718,7 \text{ Н}.$$

6) Определяем необходимый момент электромагнита:

$$M_{\text{э}} = F_{\text{ПР}} * e \leq 0,9 * [M_{\text{э}}], \text{ Н} * \text{ м}, \quad (17)$$

где $M_{\text{э}}$ – номинальный момент электромагнита, Н*м,

(принимается $[M_{\text{э}}] = 50 \text{ Н} * \text{ м}$ по [2]);

e – расстояние от оси поворота якоря до оси штока, м.

$$M_3 = 2290,8 * 0,022 \leq 0,9 * 50.$$

$$M_3 = 37,8 \leq 45.$$

7) Находим ход штока тормоза:

$$S = \frac{1,1 * 2 * \varepsilon * (l_1 + l_2)}{l_2}, \text{ м}, \quad (18)$$

где ε – рекомендуемый отход колодки, м.

$$S = \frac{1,1 * 2 * 0,0008 * (0,135 + 0,170)}{0,170} = 0,00157 \text{ м}.$$

8) Далее определим необходимый угол поворота якоря:

$$\alpha = \frac{180^\circ * S}{\pi * e} \leq 0,9 * [\alpha], \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{180^\circ * 0,00157}{3,14 * 0,022} \leq 0,9 * 5^\circ 3'.$$

где $[\alpha]$ – номинальный угол поворота якоря, $^\circ$;

S – ход штока, м.

$$\alpha = 4^\circ 05' \leq 4^\circ 32'.$$

Тормоз выбран верно.

Заключение.

Все необходимые коэффициенты, входящие в формулы расчетов, определяются группой режима работы механизма. Определение отношения механизма к той или иной группе режима работы производится по классам нагружения и использования рассматриваемого механизма подъема.

Библиографический список

1. ГОСТ 25301-95. Редукторы цилиндрические. Параметры. – Москва: Стандартанформ, 2006. – 8 с.
2. Пузырьков П.И. Методические указания к выполнению расчетов механизмов мостового крана по дисциплине «Подъемно-транспортные машины» для студентов специальности 7.090218. – Днепропетровск: НМетАУ, 1996. – 63 с.
3. Герасимов С.В., Долотов А.М., Кулаков Ю.Н. Краткий справочник для расчета грузоподъемных машин. – Братск: БрГУ, 2009 – 103 с.

Сведения об авторах

ФИО	Стрельцов Семен Викторович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д.5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	Отсутствует
e-mail	777sparta777@mail.ru

ФИО	Охалкин Тимофей Антонович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д.5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	Отсутствует
e-mail	okhapkin01@mail.ru

ФИО	Власов Евгений Николаевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д.5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	3785-3663
e-mail	vlasov-en@mail.ru

Аннотация

В статье приведен пример выбора редуктора и тормоза серии ТКТ типового механизма подъема.

Ключевые слова: механизм подъема, редуктор, тормоз.

УДК 621

Раздел рубрикатора ГРНТИ 55.51.37

ПРИМЕР РАСЧЕТА ГРУЗОВОГО БАРАБАНА, КРЕПЛЕНИЯ КАНАТА К НЕМУ И ВЫБОР НЕОБХОДИМОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА

Стрельцов С.В., Охупкин Т.А., Власов Е.Н.

Введение.

На сегодняшний день значение подъемно-транспортных машин и механизмов постоянно меняется. Они находят широкое применение во многих отраслях промышленности, сельского и лесного хозяйства, всех видов транспорта. Подъемно-транспортные устройства являются основой комплексной механизации и автоматизации производственных процессов. От правильного выбора параметров машин зависит работа всего предприятия.

Цель работы.

Показать на конкретном примере методику расчета грузового барабана, крепления каната к нему и выбор электродвигателя механизма подъема, основного механизма подъемно-транспортной машины.

Методы исследования.

При выполнении работы учтено выполнение требований Гостехнадзора к расчету элементов механизма подъема. Крепление каната к грузовому барабану осуществляется с помощью накладок.

Результаты исследования.

Исходные данные для расчета:

Грузоподъемность механизма – 2900 кг.

Скорость подъема – 12 м/мин = 0,2 м/с.

Режим работы – Средний/Умеренный.

Высота подъема груза – 35 м.

Класс использования – 3200 ч.

Кратность полистпаста – 2.

Полистпаст – одинарный.

Расчетное усилие растяжения каната – 14805 Н.

Группа режима использования М4.

Расчет грузового барабана.

Минимальный диаметр барабана, огибаемых стальными канатами, определяются по формулам:

$$D_6 \geq h_1 * d_k, \quad (1)$$

где d_k – диаметр каната, мм;

D_6 – диаметр барабана по средней линии навитого каната, мм;

h_1 – коэффициент выбора диаметра барабана (принимаем $h_1 = 16,0$ [1]).

$$D_6 \geq 16 * 11 = 176 \text{ мм.}$$

$$D_6 \geq h_1 * d_k.$$

Диаметр барабана по дну канавки для каната или гладкого барабана (рис. 1):

$$D_6 \geq 0,85 * d_k * (e - 1) = 0,85 * 11 * (25 - 1) = 224,4 \text{ мм.}$$

Окончательно диаметр барабана принимаем из нормального ряда, следовательно:

$$D_6 = 240 \text{ мм.}$$

Диаметр барабана по центру каната при однослойной навивке каната:

$$D_0 = D_6 + d_k, \text{ мм,}$$

$$D_0 = 240 + 11 = 251 \text{ мм.}$$

Диаметр реборд при однослойной навивке:

$$D_p \geq D_6 + 6 * d_k = 240 + 6 * 11 = 306 \text{ мм.}$$

Длина каната, навиваемого на барабан при заданной высоте подъёма H , м. для одинарного полиспаста:

$$L_k = H * i_{\Pi} = 35 * 2 = 70 \text{ м}$$

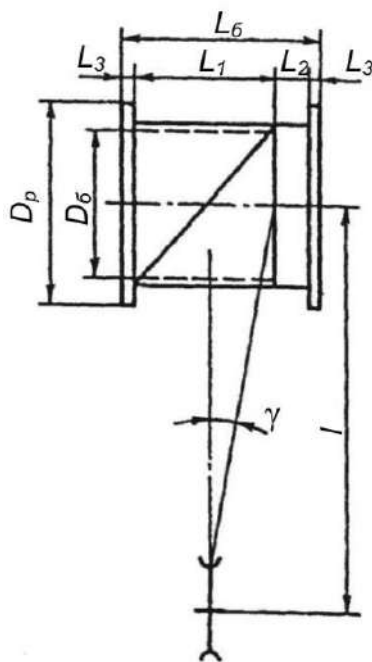


Рис. 1. Барабан нарезной для одинарного полиспаста

Длина барабана с односторонней нарезкой (рис. 1) [2]:

$$L_6 = L_1 + L_2 + 2L_3, \text{ м,} \tag{2}$$

где L_1 – длина нарезанной части барабана, м;

L_2 – расстояние для крепления каната, м;

L_3 – ширина реборды или свободного участка барабана, м;

L_0 – расстояние между нарезками, м.

$$L_1 = \left(\frac{H \cdot i_n}{\pi \cdot D_0} + Z_n \right) \cdot t, \quad (3)$$

где t – шаг нарезки, мм;

$Z_n \geq 1,5$ – число неприкосновенных витков.

$$L_1 = \left(\frac{35 \cdot 2}{3,14 \cdot 0,251} + 1,5 \right) \cdot 0,013 = 1,17 \text{ м.}$$

$$L_2 = 3t = 3 \cdot 0,013 = 0,039 \text{ м.}$$

$$L_3 = 1,5t = 1,5 \cdot 0,013 = 0,0195 \text{ м.}$$

$$L_6 = 1,17 + 0,039 + 2 \cdot 0,0195 = 1,25 \text{ м.}$$

Расчет крепления конца каната на барабане прижимными накладками.

Крепление каната к барабану должно производиться надежным способом, допускающим возможность замены каната. По требованию Гостехнадзора, в случае применения прижимных планок их должно быть не менее двух (рис. 2).

Длина свободного конца каната от прижимной планки на барабане должна составлять не менее двух диаметров каната. Расположение конца петли каната под прижимной планкой или на расстоянии от планки, составляющем менее трех диаметров каната, не разрешается.

По [1] выбираем накладку согласно диаметру каната.

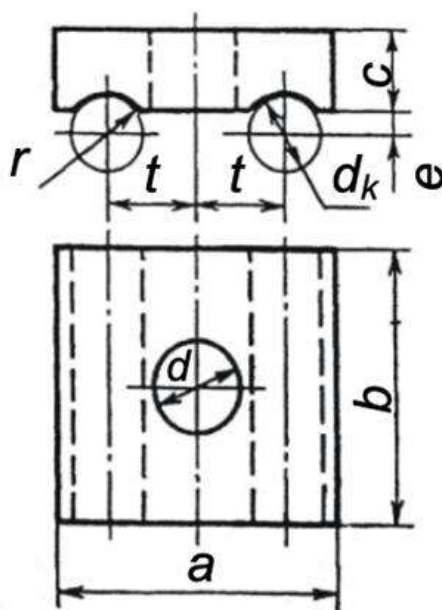


Рис. 2. Прижимная накладка

Определим допускаемое усилие растяжения болта, создающее усилие нажатия на накладку:

$$F_0 = \sigma_p * \frac{\pi * d_1^2}{4}, \text{ Н}, \quad (4)$$

где d_1 – внутренний диаметр резьбы ($d_1 \approx 0,8d \approx 0,8*13 \approx 10,4$ мм);

$[\sigma_p] = 70$ МПа для стали Ст. 3.

$$F_0 = 70\,000\,000 * \frac{3,14 * 0,0104^2}{4} = 5943,4 \text{ Н}.$$

Далее найдем расчетное натяжение каната в месте крепления:

$$S_{pk} = \frac{P_k}{e^{a*f}}, \text{ Н}, \quad (5)$$

где P_k – максимальное усилие в канате;

$e = 2,72$ – основание натурального логарифма;

$f = 0,1$ – коэффициент трения между канатом и барабаном;

$\alpha = 3\pi$ – регламентированный угол обхвата барабана
неприкосновенными витками (рад.).

$$S_{pk} = \frac{14805,1}{2,72^{3*3,14*0,1}} = 5783,2 \text{ Н}.$$

Теперь находим необходимое усилие прижатия каната накладками:

$$F = \frac{K*0,85*S_{pk}}{W}, \text{ Н}, \quad (6)$$

где $K = 1,25$ – коэффициент запаса;

$0,85$ – коэффициент, учитывающий уменьшения натяжения каната
вследствие обхвата барабана крепежными витками;

S_{pk} – расчетное натяжение каната в месте крепления, Н;

$W = 0,35$ – коэффициент сопротивления выдергиванию каната.

$$F = \frac{1,25*0,85*5783,2}{0,35} = 17556,1 \text{ Н}.$$

Определив допускаемое усилие растяжения болта и необходимое усилие прижатия каната накладками найдем необходимое число накладок:

$$Z = \frac{F}{F_0} \geq 2. \quad (7)$$

$$Z = \frac{17556,1}{5943,4} = 2,9.$$

Принимаем $Z = 3$.

Выбор электродвигателя.

Для привода крановых подъемных механизмов, работающих при повторно-кратковременном режиме, предназначаются электродвигатели серии МТ [3]. Обозначение МТ соответствует электродвигателям с фазным ротором, обозначение МТК – с короткозамкнутым ротором. Первая цифра

двухзначного числа условно характеризует наружный диаметр статорных листов, вторая – их длину, третья – полюсность машины.

Статистическая мощность двигателя при подъёме груза определяется по формуле:

$$N_{\text{ст}} = \frac{N_{\text{б}}}{\eta} = \frac{P_{\text{к}} * V_{\text{к}}}{1000 * \eta} = \frac{G * V_{\text{гр}}}{1000 * \eta}, \text{ кВт}, \quad (8)$$

где G – номинальный вес груза, Н;

$V_{\text{гр}}$ – скорость подъёма груза, м/с;

η – общий КПД привода. При двухступенчатом зубчатом редукторе:

$$\eta = \eta_{\text{п}} * \eta_{\text{б}} * \eta_{\text{р}} * \eta_{\text{м}} = 0,99 * 0,98 * 0,96 * 0,99 = 0,92.$$

$$N_{\text{ст}} = \frac{(2900 * 9,81) * 0,2}{1000 * 0,92} = 6,2 \text{ кВт}.$$

Определим расчетную мощность двигателя:

$$N_{\text{р}} = K_{\text{н}} * K_{\text{с}} * K_{\text{е}} * K_{\text{пп}} * N_{\text{ст}}, \text{ кВт}, \quad (9)$$

где K – коэффициент использования номинальной грузоподъёмности, для крюкового крана $K_{\text{н}} = 0,7$;

$K_{\text{с}}$ – коэффициент, учитывающий применяемую систему регулирования скорости, для группы режима работы 1...4М $K_{\text{с}} = 1,15$;

$K_{\text{е}}$ – коэффициент, учитывающий фактическую продолжительность включений, для группы режима работы 4М $K_{\text{е}} = 0,95$;

$K_{\text{пп}}$ – коэффициент пусковых потерь, для группы режима работы 4М $K_{\text{пп}} = 1,1$.

$$N_{\text{р}} = 0,7 * 1,15 * 0,95 * 1,1 * 6,2 = 5,21 \text{ кВт}.$$

По расчетной мощности двигателя [3] выбираем электродвигатель МТФ 211-6 и выпишем его характеристики:

- 1) Мощность на валу – 7,5 кВт.
- 2) Частота вращения вала – 930 об/мин.
- 3) Момент инерции – 0,46 кг*м².
- 4) Масса – 120 кг.

Определив электродвигатель, можно найти статистический момент на валу двигателя по формуле:

$$M_{\text{ст}} = P_{\text{к}} * \frac{D_{\text{б}}}{2} * \frac{1}{U * \eta}, \text{ Н * м}, \quad (10)$$

где $P_{\text{к}}$ – усилие в канате, навиваемое на барабан, Н;

$D_{\text{б}}$ – диаметр барабана, м;

U – передаточное число передачи от двигателя до барабана;

η – КПД передачи.

Найдем частоту вращения барабана:

$$n_{\text{б}} = \frac{60 * V_{\text{гр}} * i_{\text{п}}}{\pi * D_{\text{б}}}, \text{ об/мин}, \quad (11)$$

$$n_6 = \frac{60 * 0,2 * 2}{3,14 * 0,251} = 30,4 \text{ об/мин.}$$

$$U = \frac{n_{дв}}{n_6} = \frac{930}{30,4} = 30,6.$$

$$M_{ст} = 14805,1 * \frac{0,24}{2} * \frac{1}{30,6 * 0,92} = 63,10 \text{ Н * м.}$$

Теперь найдём динамический момент на валу двигателя от инерции поднимаемого груза:

$$M_d = m_{гр} * \frac{V_{гр}}{i_{п} * \eta_{пл}} * \frac{D_6}{2t} * \frac{1}{U * \eta}, \text{ Н * м,} \quad (12)$$

где m – масса поднимаемого груза, кг;

$V_{гр}$ – скорость поднимаемого груза, м/с;

U – передаточное число от двигателя до барабана;

η – КПД передачи;

$i_{п}$ – кратность полиспаста;

$\eta_{бл}$ – КПД блока;

n – число блоков;

t – время пуска (принимая $t = 3$ с).

$$M_d = 2900 * \frac{0,2}{2 * 0,98} * \frac{0,24}{2 * 3} * \frac{1}{30,6 * 0,92} = 0,42 \text{ Н * м.}$$

Для учета инерционных сил, действующих на весь привод, динамический момент на валу двигателя увеличим на 15...25%:

$$M'_d = 1,2 * I_{дв} * \frac{\pi * n_{дв}}{30 * t}, \text{ Н * м,} \quad (13)$$

где $I_{дв}$ – момент инерции двигателя, кг*м²;

$n_{дв}$ – частота вращения двигателя, об/мин.

$$M'_d = 1,2 * 0,46 * \frac{3,14 * 930}{30 * 3} = 21,8 \text{ Н * м.}$$

Пусковой момент на валу двигателя определяется по формуле:

$$M_{п} = M_{ст} + M_d + M'_d, \text{ Н * м.} \quad (14)$$

$$M_{п} = 63,52 + 0,43 + 21,8 = 85,75 \text{ Н * м.}$$

Теперь найдем номинальный момент на валу двигателя:

$$M_H = \frac{9550 * N_{дв}}{n_{дв}}, \text{ Н * м.} \quad (15)$$

$$M_H = \frac{9550 * 7,5}{930} = 77,1 \text{ Н * м.}$$

Далее сделаем проверку двигателя по обеспечению надежного пуска:

$$\frac{M_{п}}{M_H} = \frac{85,75}{77,1} = 1,1 < 2,5.$$

Надежность обеспечена.

Заключение.

Все необходимые коэффициенты, входящие в формулы расчетов, определяются группой режима работы механизма. Определение отношения механизма к той или иной группе режима работы производится по классам нагружения и использования рассматриваемого механизма подъема.

Библиографический список

1. *Герасимов С.В., Долотов А.М., Кулаков Ю.Н.* Краткий справочник для расчета грузоподъемных машин. – Братск: БрГУ2009 – 103 с.
2. *Александров М.П.* Подъемно-транспортные машины: учеб. для машиностроит. спец. вузов. - 6-е изд., перераб. – Москва: Высшая школа, 1985. – 520 с.
3. Асинхронные электродвигатели МТФ, МТКФ, МТН, МТКН. Asynchronous electric motors: техническое описание и инструкция по эксплуатации, 1978. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_009593458/?ysclid=mljgos7vug155494138 (дата обращения 12.02.2026 г.)

Сведения об авторах

ФИО	Стрельцов Семен Викторович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д.5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	Отсутствует
e-mail	777sparta777@mail.ru
ФИО	Охапкин Тимофей Антонович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д.5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	Отсутствует
e-mail	okhapkin01@mail.ru

ФИО	Власов Евгений Николаевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д.5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	3785-3663
e-mail	vlasov-en@mail.ru

Аннотация

В статье приведен пример расчета грузового барабана, крепления к нему каната и электродвигателя типового механизма подъема.

Ключевые слова: механизм подъема, грузовой барабан, накладки, электродвигатель.

УДК 621

Раздел рубрикатора ГРНТИ 55.51.37

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОЛЕСНОГО ФОРВАРДЕРА 8Х8 С РАЗЛИЧНЫМИ ВАРИАНТАМИ ХОДОВОЙ СИСТЕМЫ В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ

Тарадин Г.С.

Введение.

В нашей стране колоссальные объемы древесины заготавливаются в зимних условиях. Лесозаготовительная техника работает в условиях заснеженных лесосек, причем при значительной толщине снежного покрова.

Большой интерес представляет получения конкретных зависимостей для колесного форвардера 8х8 без съемных средств повышения проходимости и для форвардера, оснащенного моногусеницами на основе математических моделей [1-4] .

В работах [1-4] приводятся математические зависимости и модели, которые описывают физико-механические свойства взаимодействия опорной поверхности с движителем и процесс сжатия снега. Получены уравнения позволяющие определить фактическую глубину колеи,

сопротивления перемещению, сцепление движителя с опорной поверхностью. Также в работах [1-4] представлен расчет фактического давления на заснеженную поверхность и учет цикличности приложения нагрузки.

Цель работы – используя математические модели [1-4], получить конкретные зависимости для колесного форвардера 8х8, с различными вариантами ходовой системы.

Методы исследования

Методы теории движения колесных лесосечных машин.

Результат работы.

Разработанная математическая модель взаимодействия движителя с заснеженной опорной поверхностью учитывает основные параметры снега и движителя при расчете колесобразования и тягово-сцепных свойств лесной машины.

Входными параметрами математической модели, характеризующими снег, являются начальная плотность снега ρ_0 и толщина снежного покрова H . В зависимости от ρ_0 определяется модуль деформации снега до воздействия движителя E_0 и предельное давление движителя вблизи потери несущей способности p_{z0} [1-4]

Входными параметрами движителя являются ширина B , радиус колеса R , приведенная нагрузка на колесо G_w , скорость машины v , шаг грунтозацепов t_z , для колесного движителя дополнительно задается межосевое расстояние A . При заданных значениях параметров B , R , G_w , v , A , рассчитывается длина пятна контакта L и номинальное давление на опорную поверхность q , а также коэффициент учета длительности воздействия k_d [1-4]

Результаты расчетов при $v = 1,4$ м/с, $t_z = 0,14$ м представлены на рисунках 1 – 6. Расчеты выполнены для колесного форвардера 8х8 без съемных средств повышения проходимости и для форвардера, оснащенного моногусеницами. Диапазон давления движителя на опорную поверхность варьировался от 0 до 0,1 МПа, что позволяет распространить результаты на приведенную нагрузку до 0,06 МПа (тяжелый колесный форвардер при полной загрузке кузова).

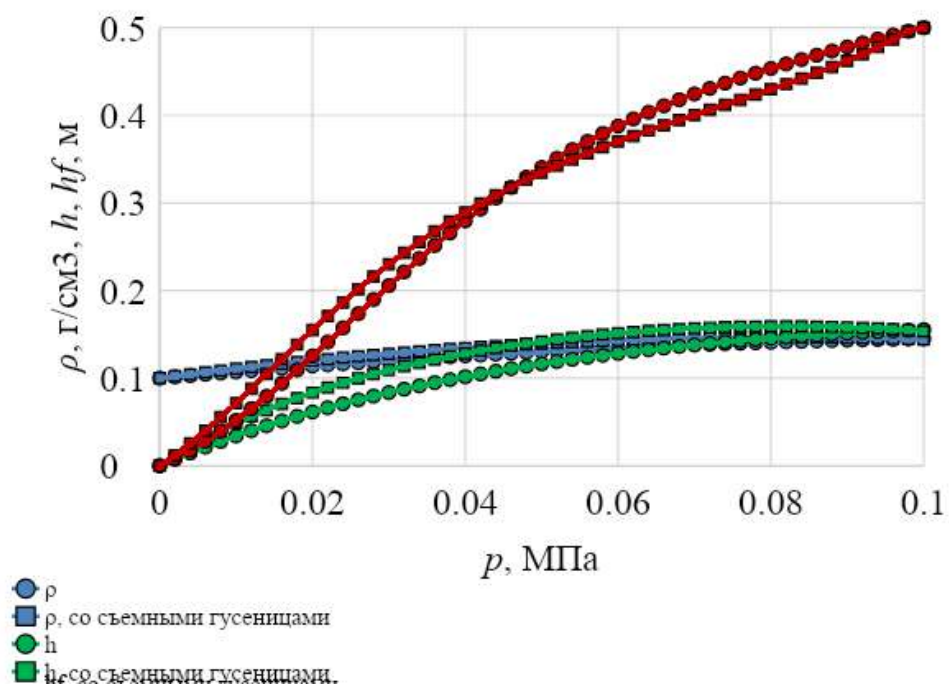


Рис. 1. Сжатие рыхлого снега и глубина колеи под воздействием движителя ($B = 0,7$ м, $L = 0,8$ м для колесного движителя, $L = 2,12$ для колесно-гусеничного движителя, $\rho_0 = 0,1$ г/см^3 , $H = 0,5$ м)

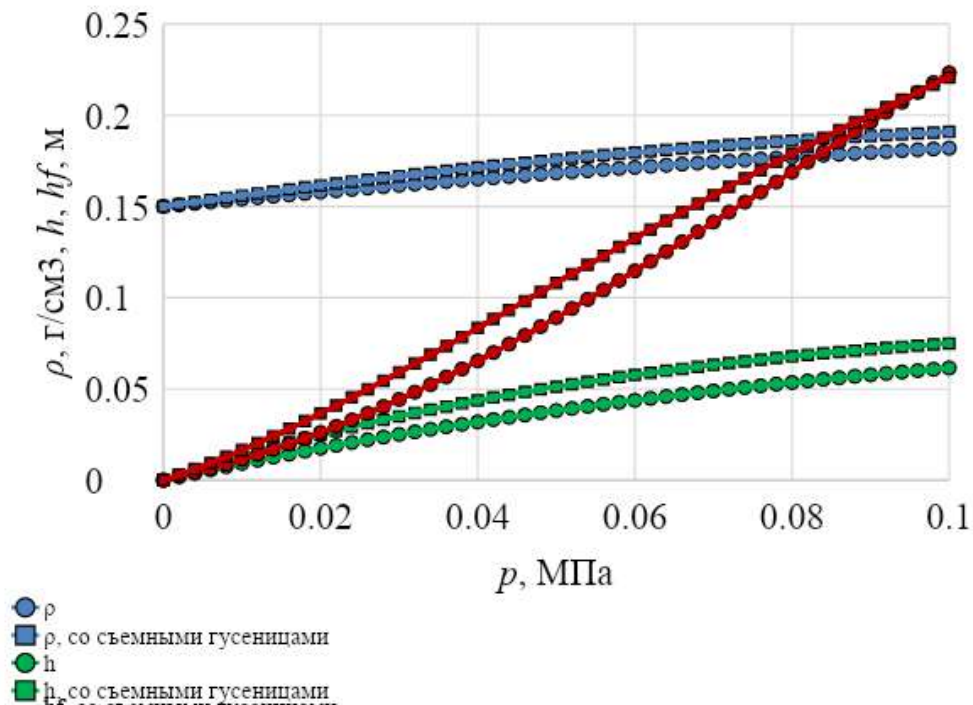


Рис. 2. Сжатие снега средней плотности и глубина колеи под воздействием движителя ($B = 0,7$ м, $L = 0,8$ м для колесного движителя, $L = 2,12$ для колесно-гусеничного движителя, $\rho_0 = 0,15$ г/см^3 , $H = 0,35$ м)

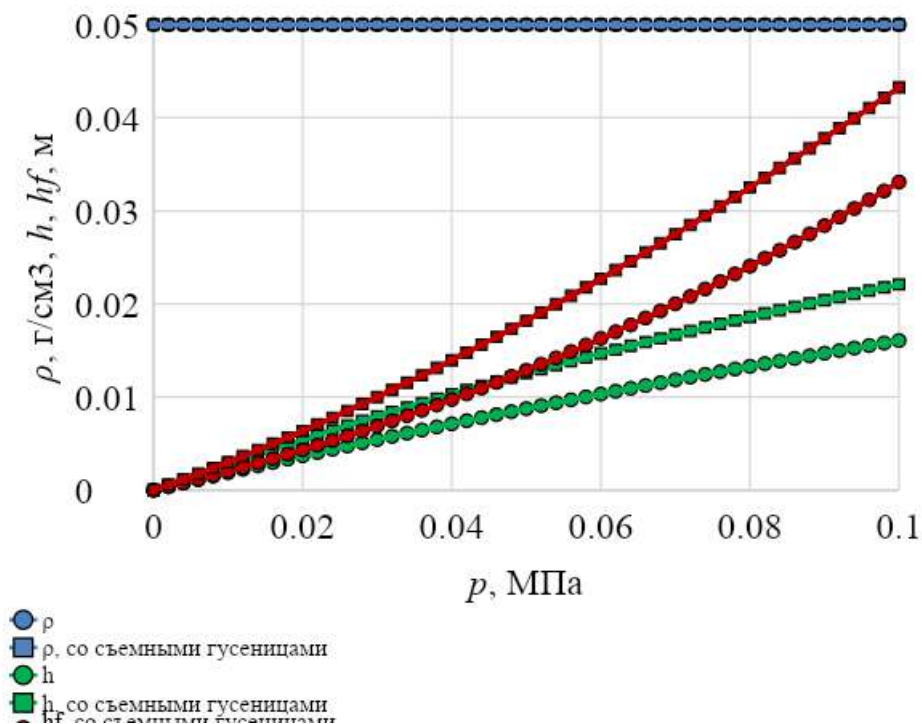


Рис. 3. Сжатие плотного снега и глубина колеи под воздействием движителя ($B = 0,7$ м, $L = 0,8$ м для колесного движителя, $L = 2,12$ для колесно-гусеничного движителя, $\rho_0 = 0,25$ Г/см³, $H = 0,25$ м)

Анализ графиков показывает, что глубина колеи, образующейся при движении форвардера по рыхлому снегу, при давлении 0,04-0,08 МПа составляет 60-80 % от толщины снежного покрова, уплотнение снега составляет 20-30%. В том же диапазоне давления при работе на снегу средней плотности глубина колеи составит 30-40 % от толщины снежного слоя, а уплотнение будет находиться в пределах 10 %. Расчетное значение глубины колеи при работе на плотной снежной поверхности не превышает 15 % толщины слоя снега, уплотнение незначительно и находится в пределах 5 %.

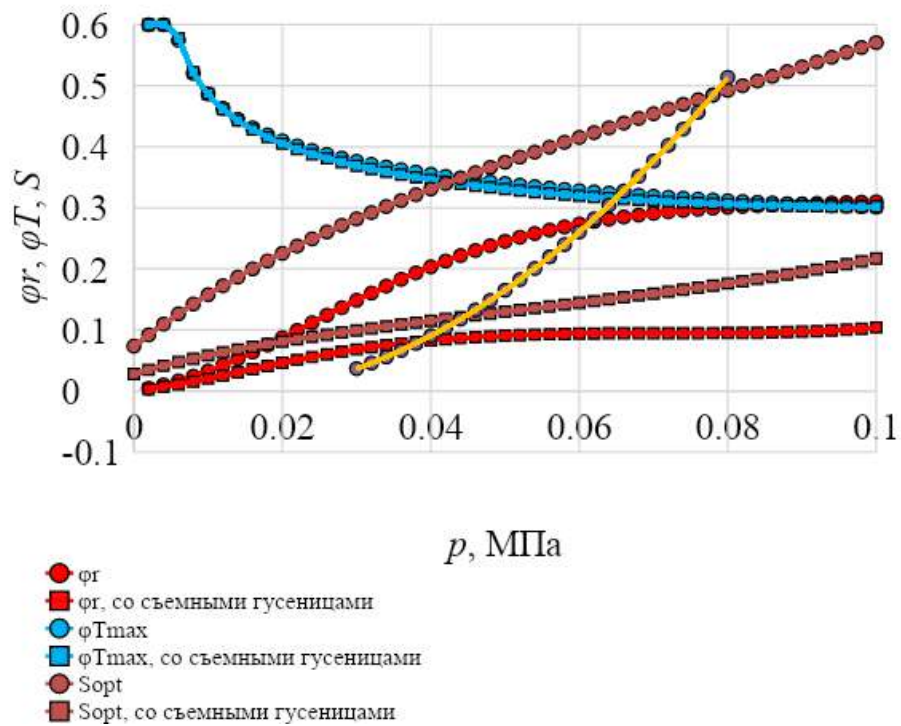


Рис. 4. Тягово-сцепные свойства движителя при работе на рыхлом снегу ($B = 0,7$ м, $L = 0,8$ м для колесного движителя, $L = 2,12$ для колесно-гусеничного движителя, $\rho_0 = 0,1$ г/см³, $H = 0,5$ м)

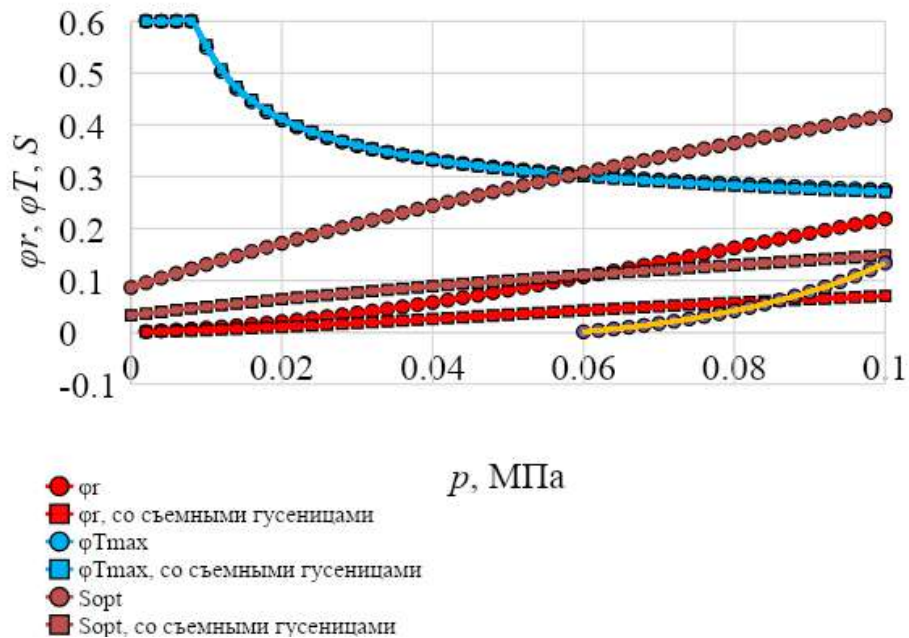


Рис. 5. Тягово-сцепные свойства движителя при работе на снеге средней плотности ($B = 0,7$ м, $L = 0,8$ м для колесного движителя, $L = 2,12$ для колесно-гусеничного движителя, $\rho_0 = 0,15$ г/см³, $H = 0,35$ м)

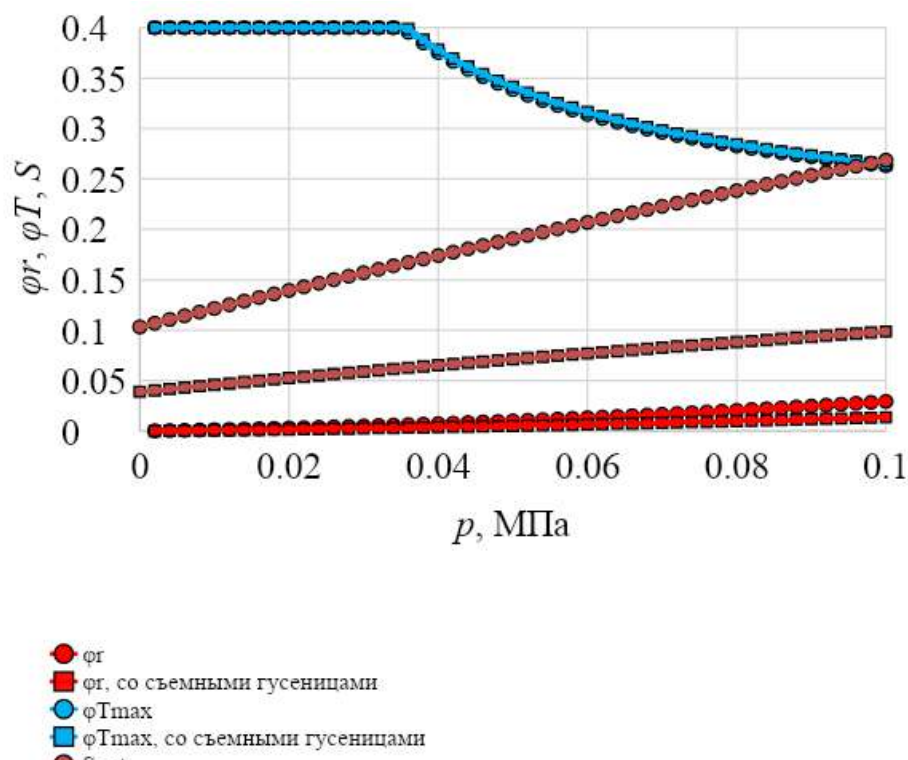


Рис. 6. Тягово-сцепные свойства движителя при работе на снеге высокой плотности ($B = 0,7$ м, $L = 0,8$ м для колесного движителя, $L = 2,12$ для колесно-гусеничного движителя, $\rho_0 = 0,25$ г/см³, $H = 0,25$ м)

Заключение.

Анализ расчетных данных показывает, что при работе на рыхлом снегу коэффициент сопротивления движению колесного форвардера составляет 0,2-0,3, увеличиваясь по мере возрастания давления движителя на опорную поверхность. Максимальный коэффициент сцепления движителя находится в пределах 0,3-0,35, причем коэффициент буксования возрастает от 0,1 до 0,6 в диапазоне давления 0,04-0,08 МПа. При давлении 0,08 МПа и выше колесный движитель, не оснащенный съёмными средствами повышения проходимости, теряет опорную проходимость на рыхлом снегу. Оснащение машины моногусеницами позволяет снизить коэффициент сопротивления движению до 0,1-0,15, коэффициент сцепления составит 0,3-0,35 при буксовании в пределах 10-20 %.

При работе на снегу средней плотности коэффициент сопротивления движению составляет 0,1-0,2. Максимальный коэффициент сцепления движителя находится в пределах 0,3-0,35 при буксовании 25-35 %. Опорная проходимость обеспечивается при буксовании 10 %. Оснащение колесной машины моногусеницами позволяет снизить коэффициент сопротивления движению до 0,05-0,1, при этом максимальный коэффициент сцепления

составит 0,3-0,35 при буксовании в пределах 10-15 %. Опорная проходимость машины будет обеспечена и без буксования.

На плотном снегу потеря опорной проходимости в исследованном диапазоне давления не происходит. Максимальный коэффициент сцепления составляет 0,3-0,4 при коэффициенте сопротивления движению до 0,1 как для машин, оснащенных моногусеницами, так и для машин без съемных средств повышения проходимости. Буксование, при котором обеспечивается максимальное сцепление с опорной поверхностью, не превышает 10 % для машин с моногусеницами и 25 % для машин без них. Опорная проходимость машины обеспечена и без буксования.

Библиографический список

1. *Тарадин Г.С.* Исследование колееобразования и тягово-сцепных свойств движителей колесных лесных машин при работе на заснеженных лесосеках: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, 2020. – 115 с.

2. *Тарадин Г.С., Котенев Е.В.* Расчет коэффициента динамичности воздействия движителя лесной машины на снег // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2018 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2019. – С. 78-84.

3. *Хитров Е.Г., Тарадин Г.С., Андронов А.В., Котенев Е.В., Пушков Ю.Л.* Теоретическое исследование глубины колеи и уплотнения снега под воздействием движителя лесной машины // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2019. – № 227. – С. 236-248.

4. *Хитров Е.Г., Андронов А.В., Тарадин Г.С., Котенев Е.В.* Расчет тягово-сцепных свойств движителя лесной машины при работе на заснеженной опорной поверхности // Resources and Technology, 2019. – Т. 16. – № 2. – С. 36-58.

Сведения об авторах

ФИО	Тарадин Григорий Сергеевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	5247- 6595
e-mail	grisha190@mail.ru

Аннотация

В работе приводятся результаты реализации математических моделей колесного движителя на заснеженной лесосеке. Расчеты выполнены для колесного форвардера 8х8 без съемных средств повышения проходимости и для форвардера, оснащенного моногусеницами. Результаты исследований могут быть использованы при создании новых и модернизации существующих колесных лесосечных машин.

Ключевые слова: математическая модель, колесный движитель, форвардер 8х8, проходимость, моногусеница.

УДК 630*3

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.15.19

ПРОЦЕСС СЖАТИЯ СНЕГА КОЛЕСНЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ НА ЛЕСОСЕКЕ

Тарадин Г.С.

Введение.

Как было отмечено в работе [1] физико-механические свойства снега изменяются в широких пределах.

Модуль деформации Ерыхлого снега не превышает 0,1 МПа, а для очень плотного снега доходит до 8 МПа; удельное сцепление Срыхлого снега менее 0,02 МПа, очень плотного – до 0,25 МПа; угол внутреннего трения φ находится в пределах 10 – 30 о; коэффициент трения резины о снег составляет ориентировочно 0,05 – 0,35; предельное напряжение, при

котором рыхлый снег теряет несущую способность при нагружении по нормали p_z – менее 0,02 МПа, по касательной p_x – менее 0,003, в то время как очень плотный снег выдерживает давление до 0,45 МПа по нормали и 0,025 МПа по касательной.

До настоящего времени взаимодействие движителей машин с опорными поверхностями рассматривалось преимущественно при постоянных значениях механических свойств грунтов. Моделирование взаимодействия движителей лесозаготовительных машин с заснеженными поверхностями имеет важную особенность – под воздействием движителей снег уплотняется, при этом существенно изменяются его физико-механические свойства, причем это изменение происходит непосредственно в процессе образования колеи.

В процессе колееобразования изменяется его модуль деформации, то есть массив упрочняется [1].

Цель работы – определение корректной математической модели взаимодействия колесного движителя со снежным покровом на лесосеке.

Методы исследования.

Методы теории движения колесных лесосечных машин по заснеженной лесосеке, математический анализ.

Результаты исследования.

Рассмотрим вначале одноосное сжатие упрочняющейся среды под воздействием нормального напряжения σ . В геометрической интерпретации диаграммы «напряжение-сжатие» модуль деформации представляет собой тангенс угла наклона касательной к графику напряжения σ от деформации ε [2]. При криволинейном графике $\sigma(\varepsilon)$ определим «мгновенный» модуль E так:

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}, \quad (1)$$

где σ – нормальное напряжение, ε – относительная деформация.

Относительная деформация ε связана с плотностью среды ρ формулой:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - \varepsilon}, \quad (2)$$

где ρ_0 – начальная плотность среды до воздействия напряжения σ .

Тогда перепишем уравнение $E = a_{E\rho} \rho^{b_E}$ следующим образом:

$$E = a_{E\rho} \left(\frac{\rho_0}{1 - \varepsilon} \right)^{b_E}. \quad (3)$$

Выразив модуль деформации E из уравнения (1), с учетом формулы (3) получим:

$$E_0 \left(\frac{1}{1-\varepsilon} \right)^{b_E} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}, \quad (4)$$

где E_0 – модуль деформации снега по формуле (3) при $\rho = \rho_0$, то есть до воздействия движителя.

Перепишем уравнение (4):

$$\frac{d\varepsilon}{d\sigma} = \frac{(1-\varepsilon)^{b_E}}{E_0}. \quad (5)$$

Решение дифференциального уравнения (5) при начальном условии $\varepsilon(0) = 0$ следующее:

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{E_0}{\sigma(b_E - 1) + E_0} \right)^{\frac{1}{b_E - 1}} \quad (6)$$

Пример результатов расчетов по формуле (6) представлен на рисунке 1, там же приведен график относительной деформации ε при постоянном значении модуля деформации $E = \text{const}$. Расчет выполнен для уплотнения рыхлого снега с начальной плотностью $\rho_0 = 0,1 \text{ г/см}^3$.

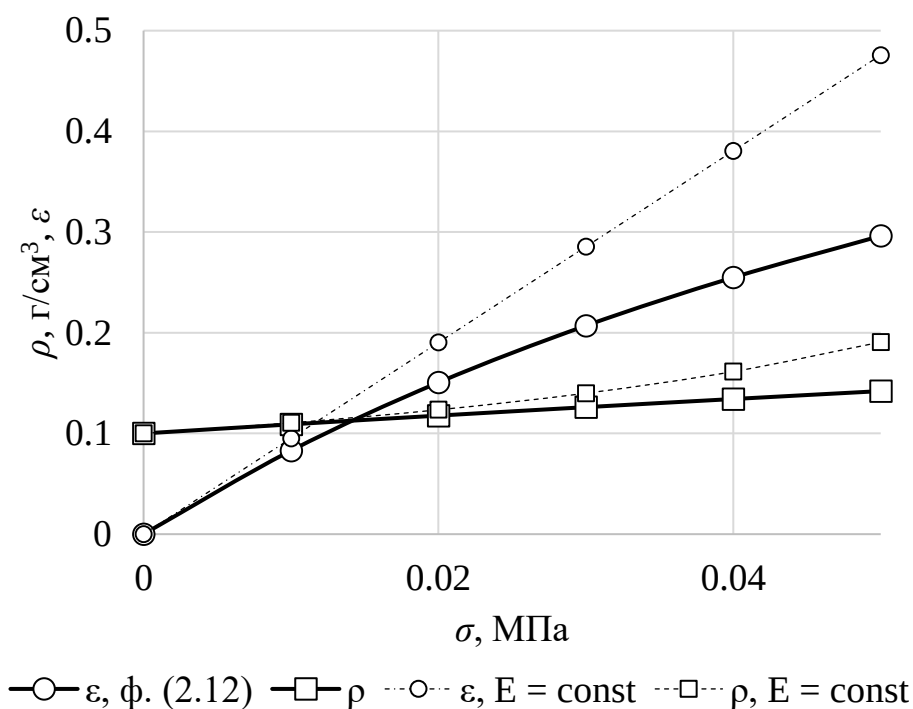


Рис. 1. Результаты расчета относительной деформации и плотности снега при переменном и постоянном модуле деформации

Как видим, значения плотности снега под воздействием движителя и относительной деформации массива, полученные с использованием уравнения (6) ниже, чем аналогичные значения, полученные при расчете с использованием постоянного значения модуля деформации. Различия в рассмотренном примере составляют до 40 %.

Далее перейдем от одноосного сжатия среды к решению задачи о вдавлении штампа-двигителя в деформируемое полупространство. Для этого определим деформацию опорной поверхности под воздействием движителя с учетом затухания напряжения по глубине снежного массива. Обратимся к схеме, представленной на рис. 2.

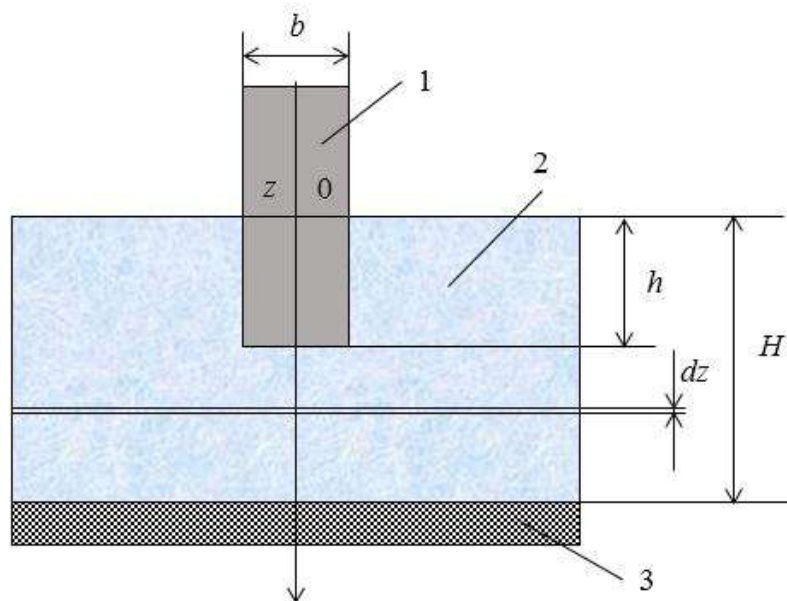


Рис. 2. Схема к расчету деформации снежного массива под воздействием движителя:

1 – движитель, 2 – массив снега, 3 – жесткое основание (мерзлый грунт)

Сжатие элементарного слоя снежного массива определим по уравнению [2,3]:

$$dh = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} dz, \quad (7)$$

где z – вертикальная координата, отсчитываемая вниз от поверхности пятна контакта движителя с опорной поверхностью.

При этом деформация сжатия всего снежного массива находится как интеграл относительных деформаций сжатия элементарных его слоев [2,3]:

$$h = \int_0^{H-h} \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} dz. \quad (8)$$

Используем уравнение для напряжения σ , возникающего под воздействием движителя и распространяющегося по глубине массива, полученное на базе решения задачи Буссинеска [2,3]:

$$\sigma = \frac{Jp}{1 + \left(\frac{z}{aB}\right)^2}, \quad (9)$$

где J – коэффициент учета геометрических параметров пятна контакта движителя с опорной поверхностью, p – давление движителя по поверхности пятна контакта, a – коэффициент учета толщины деформируемого массива (в нашем случае – высоты снежного покрова), B – ширина пятна контакта движителя с опорной поверхностью.

Параметр a рассчитывается по формуле [2,3]:

$$a = 0,64 \frac{B + H}{H}. \quad (10)$$

Параметр J найдем по формуле [2], [3]:

$$J = \frac{0,03B + L}{0,6B + 0,43L}, \quad (11)$$

где L – длина пятна контакта движителя с опорной поверхностью.

Непосредственная попытка взятия определенного интеграла по (8) с учетом (6), (9) приводит к сложностям математического характера. Для облегчения решения и упрощения последующих выкладок представим подынтегральную функцию в уравнении (8) в виде полинома Тейлора:

$$\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} = \left(\frac{(b_E - 1)\sigma + E_0}{E_0} \right)^{\frac{1}{b_E - 1}} - 1 = f \approx \sum_{n=1}^k \frac{f^n}{n!} \sigma^n \approx \sum_{n=1}^k \zeta_n \sigma^n, \quad (12)$$

где f^n – производная функции f порядка n по σ в точке 0, коэффициенты ζ_n при σ^n :

$$\begin{aligned} \zeta_1 &= \frac{1}{E_0}, \\ \zeta_2 &= -\frac{b_E - 2}{2E_0^2}, \\ \zeta_3 &= \frac{2b_E^2 - 7b_E + 6}{3E_0^3}, \\ \zeta_4 &= -\frac{6b_E^3 - 29b_E^2 + 46b_E - 24}{4E_0^4}, \end{aligned} \quad (13)$$

Коэффициенты ς_n не зависят от z , тогда запишем уравнение (8) следующим образом:

$$h \approx \sum_{n=1}^k \varsigma_n \int_0^{H-h} \sigma^n dz. \quad (14)$$

Воспользуемся известной формулой из справочного материала для взятия неопределенного интеграла рациональной дроби :

$$\int \frac{1}{(1+x^2)^n} dx = \frac{x}{2n-1} \sum_{j=1}^{n-1} \frac{(2n-1)(2n-3)(2n-5)\dots(2n-2j+1)}{2^j(n-1)(n-2)\dots(n-j)(1+x^2)^{n-j}} + \frac{(2n-3)!!}{2^{n-1}(n-1)!} \operatorname{arctg} x$$

Тогда определенные интегралы от степеней n напряжения σ по формуле (9):

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= JpaB \operatorname{arctg} \left(\frac{H-h}{aB} \right), \\ \lambda_2 &= \frac{J^2 p^2 a^2 B^2 (H-h)}{2(a^2 B^2 + (H-h)^2)} + \frac{J^2 p^2 aB}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{H-h}{aB} \right), \\ \lambda_3 &= \frac{J^3 p^3 a^4 B^4 (H-h)}{4(a^2 B^2 + (H-h)^2)^2} + \frac{3J^3 p^3 a^2 B^2 (H-h)}{8(a^2 B^2 + (H-h)^2)} + \frac{3J^3 p^3 aB}{8} \operatorname{arctg} \left(\frac{H-h}{aB} \right), \\ \lambda_4 &= \frac{J^4 p^4 a^6 B^6 (H-h)}{6(a^2 B^2 + (H-h)^2)^3} + \frac{5J^4 p^4 a^4 B^4 (H-h)}{24(a^2 B^2 + (H-h)^2)^2} + \frac{5J^4 p^4 a^2 B^2 (H-h)}{16(a^2 B^2 + (H-h)^2)} + \frac{5J^4 p^4 aB}{16} \operatorname{arctg} \left(\frac{H-h}{aB} \right) \\ &\dots \end{aligned} \quad (15)$$

Представим уравнение для определения сжатия массива:

$$h \approx \sum_{n=1}^k \varsigma_n \lambda_n. \quad (16)$$

Расчеты при варьировании $B = 0,4 \dots 0,8$ м, $L = 0,8 \dots 2,1$ м, $H = 0,2 - 1$ м, $h = 0 \dots H$, E и b_E по данным [1] показывают, что в уравнении (15) можно ограничиться $k = 2$ практически без потери точности, тогда:

$$\begin{aligned} h &= \varsigma_1 \lambda_1 + \varsigma_2 \lambda_2 = \\ &= \frac{JpaB}{E_0} \operatorname{arctg} \left(\frac{H-h}{aB} \right) + \frac{J^2 p^2 aB}{4E_0^2} \left(\frac{aB(H-h)}{a^2 B^2 + (H-h)^2} + \operatorname{arctg} \left(\frac{H-h}{aB} \right) \right). \end{aligned} \quad (17)$$

Более того, в тех же диапазонах варьирования:

$$\frac{aB(H-h)}{a^2 B^2 + (H-h)^2} \approx \frac{aB}{H} \operatorname{arctg} \left(\frac{H-h}{aB} \right), \quad (18)$$

$$\operatorname{arctg} \left(\frac{H-h}{aB} \right) \approx \frac{3}{4} \left(\frac{H-h}{aB} \right). \quad (19)$$

С учетом (18) получим из (17) с учетом (13), (15) получим:

$$h = \frac{3}{4} \frac{Jp}{E_0} (H - h) - \frac{3}{16} \frac{J^2 p^2 (b_E - 2)(aB + H)}{E_0^2 H} (H - h), \quad (20)$$

или иначе:

$$\frac{h}{H - h} = \frac{3}{4} \frac{J}{E_0} \left(1 - \frac{Jp(b_E - 2)(aB + H)}{4E_0 H} \right) p, \quad (21)$$

$$h = \frac{(1 - \chi p)pC}{1 + (1 - \chi p)pC} H, \quad (22)$$

где C – жесткость массива с учетом геометрии пятна контакта, ξ – безразмерная функция, отражающая снижение деформации сжатия за счет упрочнения массива при уплотнении, χ – коэффициент упрочнения:

$$C = \frac{3}{4} \frac{J}{E_0}, \quad (23)$$

$$\chi = \frac{1}{4} \frac{J}{E_0} \frac{(aB + H)}{H} (b_E - 2). \quad (24)$$

Заключение.

Полученное уравнение (24) позволяет определить сжатие деформируемого снежного массива под воздействием колесного движителя лесосечных машин. Следует однако отметить, что общая деформация массива состоит не только из сжатия, но и из сдвига слоев снега, что будет учтено в следующих работах.

Библиографический список

1. Тарадин Г.С. Исследование колесобразования и тягово-цепных свойств движителей колесных лесных машин при работе на заснеженных лесосеках: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, 2020. – 115 с.
2. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. – Москва: Машиностроение, 1981. – 232 с.
3. Ларин В.В. Методы прогнозирования и повышения опорной проходимости многоосных колесных машин на местности: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Москва: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2007.

Сведения об авторах

ФИО	Тарадин Григорий Сергеевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт- Петербург, Россия
SPIN-код	5247- 6595
e-mail	grisha190@mail.ru

Аннотация

В статье приводятся теоретические основы сжатия снега под воздействием колесного движителя. В результате исследований получена корректурная математическая модель взаимодействия колесного движителя со снежным покровом на лесосеке. Уравнение позволяет определить сжатие деформируемого снежного массива под воздействием колесного движителя.

Ключевые слова: колесный движитель, трелевочный трактор, лесосека, снежный массив, математическая модель.

УДК 630*3

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.15.19

РАСЧЕТ ДАВЛЕНИЯ КОЛЕСНОГО ДВИЖИТЕЛЯ НА СНЕГ С УЧЕТОМ ЦИКЛИЧНОСТИ ПРИЛОЖЕНИЯ НАГРУЗКИ

Тарадин Г.С.

Введение.

При рассмотрении вопросов взаимодействия движителей колесных лесных машин с опорными поверхностями до настоящего времени преимущественно рассматривалось при постоянных значениях механических свойств грунтов.

Для составления корректных математических моделей взаимодействия движителя со снегом необходимо проанализировать свойства опорной поверхности и их изменения.

Имеются работы где представлены формулы, связывающие модуль деформации E [МПа], удельное сцепление C_0 [МПа], угол внутреннего трения φ [о] и коэффициент трения резины о снег $\mu_{тр}$ с его удельным весом γ [МН/м³] и температурой T [°С]. Зависимости указанных свойств от удельного веса имеют степенной характер, причем коэффициенты в уравнениях изменяются в зависимости от температуры.

При моделировании взаимодействия колесных движителей лесосечных машин с заснеженными поверхностями имеет важное значение расчет фактического давления на эту поверхность с учетом цикличности приложения нагрузки. До настоящего времени взаимодействие движителей лесных машин с опорными поверхностями рассматривалось преимущественно при постоянных значениях механических свойств грунтов.

Цель работы – получить фактические значения давления колесного движителя лесосечных машин на рыхлый снег и на снег средней плотности.

Методы исследования.

Методы теории движения гусеничных и колесных машин по бездорожью.

Результаты исследования.

Номинальное давление движителя на опорную поверхность q рассчитаем с учетом рекомендаций [1]. Для колесного движителя:

$$q = \frac{G_w}{BL} = \frac{G_w}{BR}, \quad (1)$$

где G_w – приведенная нагрузка на колесо (частное веса машины и общего числа колес), R – радиус колеса.

Для колесно-гусеничного движителя [1]:

$$q = \frac{2G_w}{BL} = \frac{2G_w}{B(1,25R + A)}, \quad (2)$$

где A – межосевое расстояние.

Для учета многократного воздействия движителя на заснеженную поверхность при последовательном проходе колес по следу воспользуемся следующим подходом: будем использовать значение давления p с учетом поправочного коэффициента на длительность воздействия нагрузки [2,3]:

$$p = q \cdot k_d, \quad (3)$$

где k_d – повышающий коэффициент, учитывающий суммарное время воздействия машины на снег.

Коэффициент k_d представляет собой соотношение мгновенной деформации опорной поверхности ε_0 и ее действительное значение ε ,

определяемое с учетом времени воздействия и реологической модели опорной поверхности:

$$k_d = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} . \quad (4)$$

Значение ε_0 определим по формуле:

Известно, что поведение снега при уплотнении описывается реологической моделью Гогенемзера-Прагера. Тогда значение ε найдем из решения дифференциального уравнения:

$$\sigma + \frac{\eta}{E + E_\partial} \frac{d\sigma}{dt} = \frac{EE_\partial}{E + E_\partial} \varepsilon + \frac{E\eta}{E + E_\partial} \frac{d\varepsilon}{dt} , \quad (6)$$

где η – вязкость снега, E_∂ – модуль длительной деформации, t – время воздействия.

При $\sigma = \text{const}$ и $\varepsilon(0) = \varepsilon_0$ получим решение уравнения (6):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{E_\partial} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_\partial}{\eta} t\right) \right) . \quad (7)$$

Тогда коэффициент k_d по формуле (2):

$$k_d = 1 + \frac{E}{E_\partial} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_\partial}{\eta} t\right) \right) . \quad (8)$$

Суммарное время воздействия машины на грунт определим по уравнению [4]:

$$t = n \frac{L}{v} , \quad (9)$$

где v – скорость поступательного движения машины, n – число последовательных проходов движителя по следу (для форвардера 8х8 $n = 4$, $L = R$; для форвардера 8х8, оснащенного моногусеницами, $n = 2$, $L = 1,25R + A$).

Ориентируясь на [1], примем зависимость η [МПа·с] от ρ [г/см³]:

$$\eta = \frac{1}{\rho} . \quad (10)$$

Согласно [1], соотношение η и E_∂ следующее:

$$\frac{\eta}{E_\partial} = \frac{1}{2\varphi} . \quad (11)$$

Тогда E_∂ [МПа] определим в зависимости от ρ [г/см³], φ [°] по формуле:

$$E_o = \frac{2\varphi}{\rho} . \quad (12)$$

С учетом формул [1], коэффициент k_d зависит от ρ , t , зависимость проиллюстрирована на рис. 1.

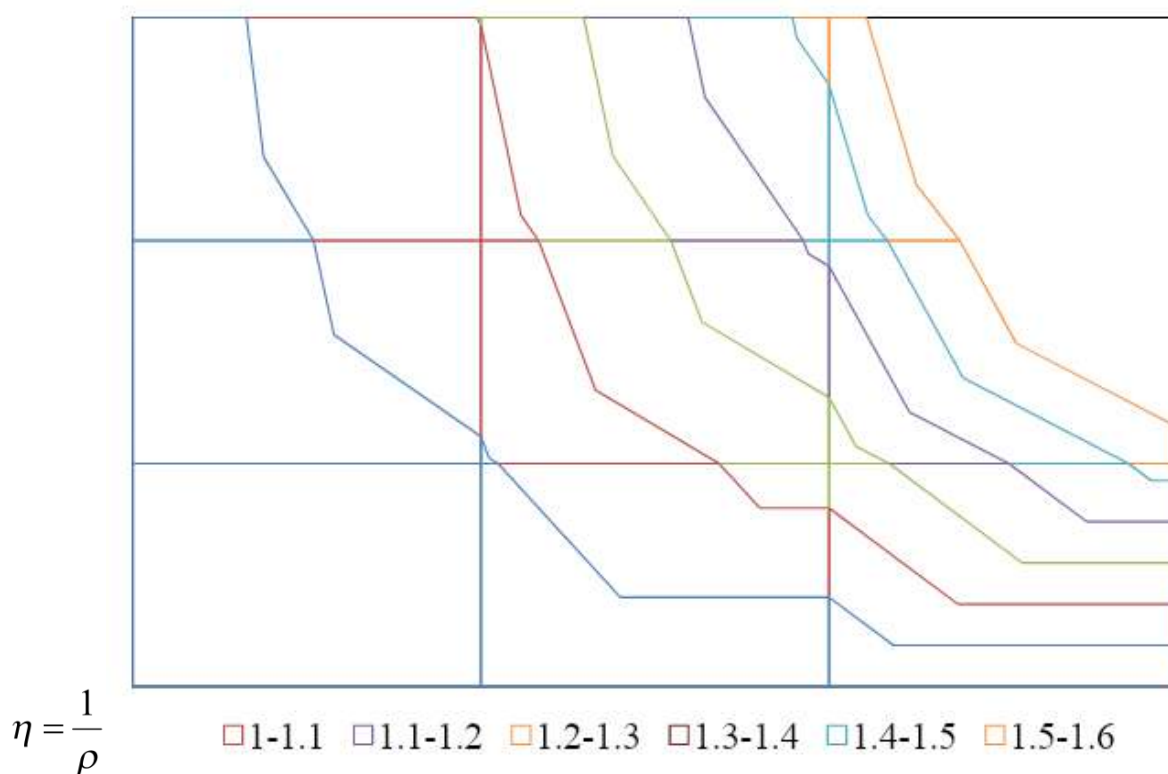


Рис. 1. Зависимость повышающего коэффициента к номинальному давлению от плотности снега и длительности воздействия

Результаты расчетов показывают, что при расчете показателей воздействия движителя на рыхлый снег фактическое давление движителя следует принимать на 5-7 % выше номинального, при расчете воздействия на снег средней плотности фактическое давление выше номинального на 15-20 %.

Заключение.

По результатам вычислений с использованием реологической модели снега Гогенемзера-Прагера установлено, что для учета цикличности и времени воздействия движителя на заснеженную опорную поверхность, фактическое давление движителя следует принимать на 5-7 % выше номинального при расчете показателей воздействия движителя на рыхлый снег; при расчете воздействия на снег средней плотности фактическое давление следует принимать выше номинального на 15-20 %.

Глубина колеи, образующейся при движении форвардера по рыхлому снегу, при давлении 0,04-0,08 МПа составляет 60-80 % от толщины

снежного покрова, уплотнение снега составляет 20-30%. В том же диапазоне давления при работе на снегу средней плотности глубина колеи составит 30-40 % от толщины снежного слоя, а уплотнение будет находиться в пределах 10 %. Расчетное значение глубины колеи при работе на плотной снежной поверхности не превышает 15 % толщины слоя снега, уплотнение незначительно и находится в пределах 5 %.

Библиографический список

1. *Тарадин Г.С.* Исследование колееобразования и тягово-сцепных свойств движителей колесных лесных машин при работе на заснеженных лесосеках: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, 2020. – 115 с.
2. *Бабков В.Ф., Безруков М.В.* Основы грунтоведения и механики грунтов. – Москва: Высшая школа, 1976. – 328 с.
3. *Хахина А.М.* Оценка коэффициента динамичности нагрузки на лесной почвогрунт // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практики. – Воронеж: ВГЛУ, 2015. – Т. 3. – № 2-2 (13-2). – С. 361-364.
4. *Агейкин Я.С.* Проходимость автомобилей. – Москва: Машиностроение, 1981. – 232 с.

Сведения об авторах

ФИО	Тарадин Григорий Сергеевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	5247- 6595
e-mail	grisha190@mail.ru

Аннотация

Статья посвящена расчету фактического давления на заснеженную поверхность и учету цикличности приложения нагрузки лесосечных машин. Получены фактические значения давления колесного движителя лесосечных машин на рыхлый снег и на снег средней плотности. По результатам вычислений с использованием реологической модели снега Гогенемзера-Прагера установлено, что для учета цикличности и времени воздействия движителя на заснеженную опорную поверхность, фактическое давление движителя следует принимать на 5-7 % выше номинального при расчете показателей воздействия движителя на рыхлый снег; при расчете воздействия на снег средней плотности фактическое давление следует принимать выше номинального на 15-20 %.

Ключевые слова: колесный движитель, лесосека, снежный массив, математическая модель, заснеженная поверхность.

УДК 630*3

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.15.19

ВОЗМОЖНОСТИ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛЕСНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Трофимов А.В., Зверев И.А., Просвирина Д.А., Трифонов Н.И.

Введение.

Процедура разработки технологического процесса (ТП) изготовления изделия связана с принятием решений в условиях значительной неопределённости. Результат процессов зависит от большого количества факторов: структурных элементов системы; параметров, определяющих их состояние и результаты взаимодействия. Параметры, характеризующие элементы, имеют случайную природу с наличием систематических постоянных и закономерно изменяющихся составляющих. Перечисленные причины определяют итерационный характер процесса проектирования и существенную зависимость его результатов от опыта инженера-технолога и его владения реальной ситуацией на производстве.

Система стандартов ЕСТПП, с учётом перечисленных причин и опыта проектирования, регламентирует процедуру разработки ТП через

определённый перечень этапов и последовательность их выполнения (Р 50-54-93-88 «Рекомендации. Классификация, разработка и применение технологических процессов»). Методика реализации достаточно отработана и в базовом варианте составляет, по данным разных источников, от 25 до 40% трудоёмкости работ по подготовке производства (рис.1) [1].

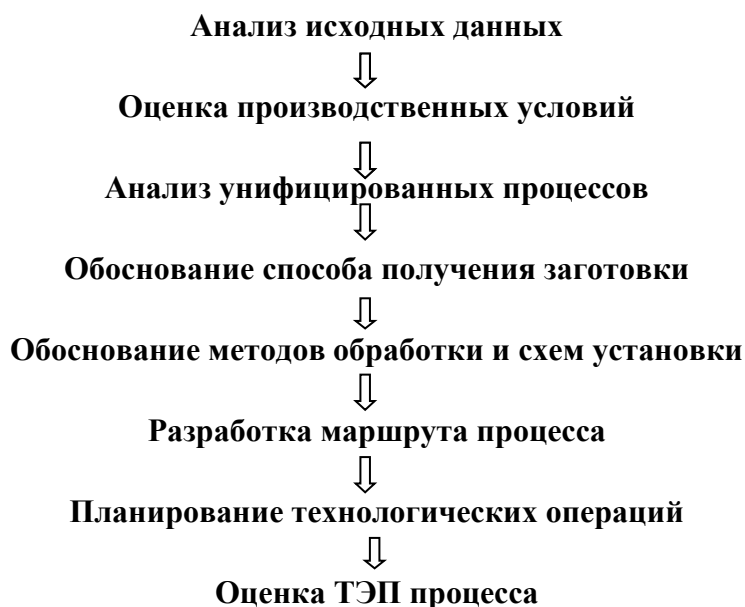


Рис. 1. Этапы разработки ТП

Требования к сокращению сроков освоения производства новой продукции и ограничения кадрового обеспечения требуют качественного сокращения сроков и затрат на проектирование.

Цель работы – провести оценку возможностей применения цифровых технологий в процессах технологического проектирования.

Методы исследования.

Методы системного анализа опыта применения цифровых технологий в проектировании технологических процессов отраслевого машиностроения.

Результаты исследования.

Одним из основных направлений решения проблемы является подключение возможностей вычислительной техники. Реализация подразумевает два этапа:

- насыщение каждого шага проектирования (рис.1) применением доступных систем САПР (третья научно-техническая революция) [2];

- использование возможностей технологий, получивших путёвку в жизнь, благодаря четвёртой научно-технической революции (НТР) [3] (рис.2).

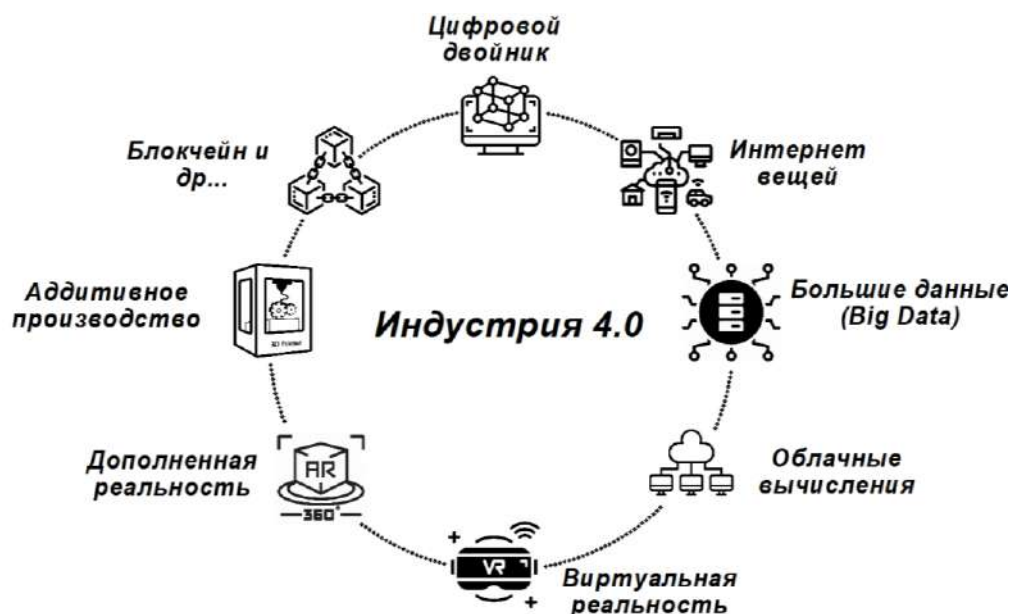


Рис. 2. Технологии 4 этапа НТР

Формирование и использование систем САПР на первом этапе обеспечивает увеличение производительности и качества процессов обработки, передачи и представления информации. Регламент проектирования (перечень и последовательность этапов), как и прежде, устанавливается требованиями системы стандартов ЕСТПП (ЕСКД).

Эффективное применение программных продуктов, представленных на рынке, базируется на использовании доступного, для предприятий отраслевого машиностроения, аппаратного обеспечения (серверы, ПК) посредством управления инженером-технологом с базовым образованием.

По данным фирмы АСКОН наблюдается рост производительности (2-5 раз) и качества процесса проектирования, а, следовательно, и снижение затрат на подготовку производства, отнесённых к единице выпускаемой продукции.

Комплекс работ, выполненных на кафедре ЛМСиР СПбГЛТУ имени С.М. Кирова, даёт возможность провести оценку результатов применения вариантов САПР в цепочке проектирования ТП.

- Комплексы выполняют одну задачу в соответствии с требованиями стандартов ЕСТПП, в необходимом объёме, с требуемым качеством.
- Ценовой диапазон продуктов (в зависимости от комплектации) отличается несущественно и соответствует стоимости систем

«средней» группы. С учётом типа производства (мелкосерийное) и объёма решаемых задач этого вполне достаточно.

- В зависимости от финансовых возможностей производителя часть функций проектирования может выполняться более бюджетными «лёгкими» («экзотическими») САПР.
- Каждая из программ построена по модульной схеме, имеет «открытую архитектуру» и существенные, гибкие резервы совершенствования и развития [4].

В целом, этап находится на стадии совершенствования (участок «сдержанного» роста с выходом на плато графика рис. 3) и имеет определённые резервы повышения эффективности работ. Качественный рост может быть обеспечен применением технологий 4 этапа НТР (рис. 2).

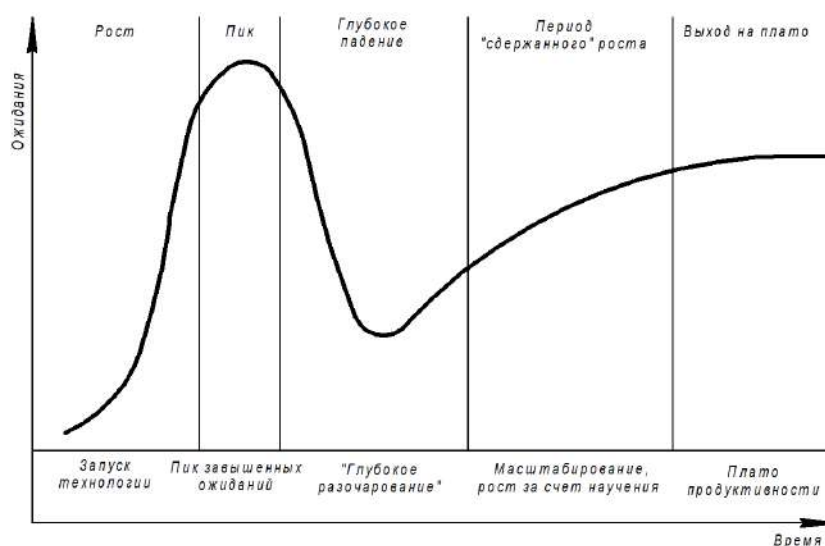


Рис. 3. Этапы освоения новых технологий

Этап существенно расширяет возможности повышения эффективности проектирования, в зависимости от условий выполнения работ:

- проектирование процессов применительно к существующей производственной структуре (наиболее часто встречающийся вариант);
- формирование вновь создаваемых производств.

В первом случае, как правило, эффективно использование отдельных базовых технологий в ограниченных границах применения (наиболее часто встречающийся вариант для отрасли). В работе [5] достаточно полно представлен вариант расширения возможностей традиционных ТП ремонта лесных и транспортных машин на предприятии ООО НПП «Леспромсервис» за счёт использования отдельных групп процессов

аддитивного производства. Предложен вариант расширения сервисных возможностей последовательной реализацией двух этапов применения АМ-технологий в условиях конкретного производства:

- изготовление деталей (запасных частей) в условиях дефицита времени в сложных условиях импортозамещения (особенно сложной конфигурации);

- восстановление изношенных поверхностей деталей (в том числе сложной конфигурации).

Базовые технологии 4 этапа НТР предоставляют значительно более широкие возможности при проектировании новых производств с учётом их применения на большинстве этапов жизненного цикла изделий т.к. требуются существенные финансовые вложения во все элементы вычислительного комплекса (аппаратное обеспечение, программные продукты, специализированные базы данных, подготовка кадров) и производства (характеристики предмета труда, средств производства, кадрового обеспечения и др.). В большей степени эффект от реализации базовых технологий можно отнести к стратегическим целям развития производства (этап запуска технологии на рис.3).

Заключение.

1. Одним из основных направлений сокращения сроков освоения производства новой продукции в условиях ограничений кадрового обеспечения является подключение возможностей вычислительной техники. Представленные этапы реализации последовательно решают одну задачу – увеличение производительности и качества процессов обработки, передачи и представления информации в процессах проектирования технологии. Регламент проектирования (перечень и последовательность этапов), как и прежде, устанавливается требованиями системы стандартов ЕСТПП (ЕСКД), т. е. не изменяется по содержанию и последовательности работ.

2. Эффект применения ЦТ может обеспечить рост производительности труда технолога в 2-5 раз в зависимости от квалификации специалистов и сложности изделия для условий мелкосерийного производства. Элементы структуры системы САПР доступны по финансам, представлены на рынке, обеспечены кадрами и понятны собственнику.

3. Эффективность применения базовых технологий четвёртого этапа НТР в лесном машиностроении существенно ограничена и возрастает при их использовании на всех этапах жизненного цикла изделий. Ограниченный эффект может наблюдаться при постепенном встраивании базовых

процессов в производство, поэтапно расширяя его возможности, в т. ч. по подготовке кадров для более сложных вариантов технологий (пример АМ – процессов).

Библиографический список

1. Трофимов А.В. [и др.]. Основы технологии машиностроения. Проектирование технологических процессов: учебное пособие. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2013. – 72 с.

2. Трофимов А.В. [и др.]. Компьютерные технологии в машиностроении. Технологии жизненного цикла: учебное пособие для студентов направления подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование». – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2020. – 108с.

3. Трофимов А.В., Зверев И.А. Компьютерные технологии в машиностроении. Индустрия 4.0: учебное пособие для студентов направления подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование». – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2022. – 68 с.

4. Лазуткина А.А., Трофимов А.В. Применение продуктов группы САРР в проектировании технологических процессов лесного машиностроения // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам НИР 2024 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2025. – 395 с.

5. Трофимов А.В., Зверев И.А., Потапов Р.В., Трифионов Н.И. Возможности аддитивных технологий в ремонтном производстве лесной отрасли // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам НИР 2024 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2025. – 395 с.

Сведения об авторах

ФИО	Трофимов Александр Викторович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	8933-0230
e-mail	agregat9@yandex.ru

ФИО	Зверев Игорь Андреевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	1126-2121
e-mail	igorzv1997@gmail.com

ФИО	Просвирина Дарья Алексеевна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	Отсутствует
e-mail	dashaprosvirina02@gmail.com

ФИО	Трифонов Никита Игоревич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	6203-4329
e-mail	dr.nikita-2017@yandex.ru

Аннотация

В статье проведена оценка возможностей применения цифровых технологий в проектировании технологических процессов лесного машиностроения. Рассмотрены этапы внедрения систем САПР и базовых технологий четвертого этапа научно-технической революции, показано их влияние на производительность труда и качество технологического проектирования в условиях мелкосерийного производства.

Ключевые слова: цифровые технологии, технологический процесс, технологическое проектирование, САПР, лесное машиностроение.

УДК 621.7

Разделы рубрикатора ГРНТИ 55.13.17

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ «ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК» В ЛЕСНОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

Трофимов А.В., Зверев И.А., Просвирина Д.А., Трифонов Н.И.

Введение.

Взрывной рост интереса к базовым технологиям 4-ой научно-технической революции (НТР) обусловлен, в первую очередь, возможностями перехода производства на более высокий уровень автоматизации, что связано с широким применением вычислительной техники (3-я НТР). Перечень начинается с технологий класса «Цифровой двойник». В условиях неустоявшейся терминологии важно представлять суть технологии и возможности её применения в реальном производстве в целях повышения его эффективности.

Цель работы – рассмотреть возможности применения технологии «Цифровой двойник» при разработке технологических процессов в лесном машиностроении.

Методы исследования.

Методы системного анализа опыта применения цифровых технологий в машиностроении.

Результаты исследования.

Множество вариантов определения, встречающееся в открытых источниках (цифровой двойник / дублер; цифровой близнец; цифровой клон: цифровой аватар; цифровой кузен; цифровой образец / мастер; виртуальный двойник; гибридный двойник; электронный двойник и др.), свидетельствует о неустоявшейся терминологии и «размытости» понимания практики применения [1]. Формулировки вида «.....Особое место в этом ряду принадлежит цифровым двойникам, поскольку они могут выступать не только как отдельная технология, но и как результат применения этой технологии» не добавляют определённости для потенциальных пользователей. Существенную ясность внес, относительно недавно введённый стандарт [2], представляющий следующую формулировку.

Цифровой двойник изделия (ЦД) -система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями. Характерный признак технологии – возможность сбора и обмена информацией о реальном объекте (рис.1). Объект материального мира может быть представлен в виртуальном мире, так что виртуальная часть отражает физическую, а физическая —

виртуальную. При этом виртуальная и физическая части объекта соединены информационной связью.



Рис. 1. Цифровой двойник [1]

В практике проектирования структур термин существует давно и прошёл трансформацию от идей и мыслей в формализованные модели, описывающие объекты реального мира.

Подключение к виртуальной модели позволяет получать информацию о состоянии физического объекта в «текущем» режиме. Информация, в дальнейшем, позволяет вносить нужные правки в конструкцию изделия во время проектирования, в технологические процессы изготовления и планировать своевременные предупредительные мероприятия по техническому обслуживанию и ремонту объекта.

Концепция взаимодействия физического продукта в реальном мире, его цифровой копии в виртуальном мире и наличия информационной связи между ними, объединяющей виртуальное и материальное пространство, по сути, и отображает идею технологии класса «цифровой двойник» (ЦД) [3]. В качестве объекта технологии может выступать изделие, элемент изделия, процесс, экономическая или социальная структура.

В физический объект встроены датчики (средства измерения параметров), которые собирают данные о его состоянии в реальном времени. Данные отправляются цифровому двойнику; на базе полученной информации уточняется цифровая модель. Информационный обмен включает сбор, фильтрацию, безопасную передачу, проверку, классификацию, сжатие (дедупликацию), надежное хранение, извлечение, обработку, анализ данных и визуализацию для представления пользователю.

ЦД учитывает все изменения, происходящие с объектом, накапливает информацию о его поведении и по мере уточнения может более адекватно описывать и прогнозировать его поведение. Например, модель может предсказать возможность отказа определенного узла, рекомендовать время профилактического обслуживания, проведения техосмотра, смены

фильтров и т.п. ЦД становится точным представлением физической системы в реальном времени, при любых ее изменениях [1].

Степень адекватности цифровой модели (стоимость реализации технологии) определяется экономической целесообразностью и целью её применения (рис. 2). Наличие модели с высокой степенью адекватности позволяет перейти от натурных экспериментов и испытаний реальных образцов к виртуальным экспериментам, тестированию и испытаниям ЦД, что занимает меньше времени и обходится значительно дешевле. Модель (цифровой двойник) дает возможность инженерам провести виртуальные испытания и оптимизировать характеристики объекта еще до его создания.

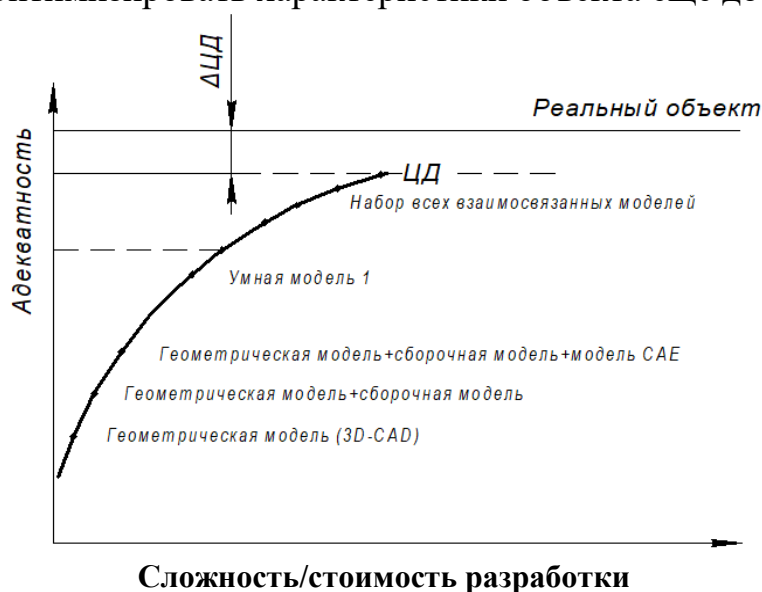


Рис.2. Связь адекватности и сложности цифровой модели [3]

Китайские ученые предложили рассматривать четыре этапа в построении модели цифрового двойника: геометрическая модель, модель физических процессов, поведенческая модель и модель, основанная на правилах. Модели являются «вложенными» в том смысле, что геометрическая модель является базисом для последующих моделей, и каждая новая стадия дополняет возможности предыдущих [1]. Уровень реализуемых возможностей зависит от целей применения технологии.

Комплекс технологий, аппаратных и программных средств, необходимых для получения цифровой модели готового изделия или процесса, в машиностроении называется реверс-инжинирингом или обратным инжинирингом.

Взаимодействие физического объекта и виртуальной копии обеспечивается через платформы промышленного интернета с использованием специального программного обеспечения, предоставляемого фирмами ANSYS Inc., Dassault Systèmes, Mevea и др.

Следует отметить, что пока российский рынок ЦД находится в самом начале своего пути, и решений класса ЦД, построенных исключительно на российских технологиях, пока нет. На отечественном рынке CAD/CAM/CAE заметную долю наряду с западными компаниями имеет лишь фирма АСКОН.

Компания АСКОН является участником и одним из организаторов консорциума разработчиков инженерного программного обеспечения «РазВИТие» – независимого объединения IT-компаний, в которое, помимо АСКОН, входят НТЦ «АПМ», ADEM, ТЕСИС и ЭРЕМЕКС, занятые в создании единого российского CAD/CAM/CAE/PLM/MES-решения на базе существующей продукции. Консорциум является открытым сообществом и развивает функциональность цифровой платформы «РазВИТия».

Среди рыночных поставщиков решений и услуг по построению цифровых двойников выделяется лидер – Центр компетенций НТИ «Новые производственные технологии» СПб ПУ. Центр работает над проектами по таким направлениям, как цифровое проектирование и моделирование, разработка цифровых двойников изделий и производственных процессов; создание виртуальных испытательных стендов и технологий управления производством.

Считается, что в России технология ЦД впервые была реализована в области автомобильной промышленности, в рамках проекта «Кортеж», – для разработки единой модульной платформы и проектирования кузовов лимузина, седана, минивэна и внедорожника.

На текущий момент в Российской Федерации цифровые двойники интересны только предприятиям нефтегазового и обрабатывающего сектора, а также компаниям, которые производят высокотехнологичную продукцию (авиационная и космическая промышленность).

Заключение.

1. Технология ЦД является базовой в обеспечении обработки информации в ЖЦ объектов отраслевого машиностроения, обеспечивая их эффективность при высокой степени автоматизации как на отдельных этапах, так и цикле в целом.

2. Примеры использования технологии присутствуют на российском рынке, но их применение целесообразно, в основном, для производства высокотехнологичной (и финансовоемкой) продукции. Для отраслевого машиностроения характерны условия мелкосерийного производства с достаточно узкими границами варьирования и ограниченными возможностями финансирования.

3. Компоненты российского рынка ЦД лесных машин развиваются в рамках третьего этапа НТР и при централизованном подходе могут явиться основой для обеспечения эффективности технических систем в пределах ЖЦ. Наибольший эффект, по мнению экспертов, может быть обеспечен за счёт этапов проектирования и эксплуатации.

Библиографический список

1. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / под науч. ред. А.И. Боровкова. – Москва: АльянсПринт, 2020. – 401 с. URL: <https://dfnc.ru/wp-content/uploads/2020/09/Kniga-TSfirovoj-dvojn timer.pdf>

2. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – Москва: Российский институт стандартизации, 2021. – 10 с.

3. Трофимов А.В., Зверев И.А. Компьютерные технологии в машиностроении. Индустрия 4.0: учебное пособие для студентов направления подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование». – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2022. – 68 с.

Сведения об авторах

ФИО	Трофимов Александр Викторович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	8933-0230
e-mail	agregat9@yandex.ru
ФИО	Зверев Игорь Андреевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	1126-2121
e-mail	igorzv1997@gmail.com

ФИО	Просвирина Дарья Алексеевна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	dashaprosvirina02@gmail.com

ФИО	Трифонов Никита Игоревич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	6203-4329
e-mail	dr.nikita-2017@yandex.ru

Аннотация

В статье рассмотрены перспективы внедрения технологии «цифровой двойник» в лесном машиностроении. Проанализированы подходы к определению и структуре цифровых двойников, их функциональные возможности и этапы построения моделей. Описаны особенности применения технологии в процессах проектирования и эксплуатации изделий, а также оценены возможности ее использования в условиях мелкосерийного производства. Показано влияние цифровых двойников на повышение эффективности и качества инженерных решений на различных этапах жизненного цикла продукции.

Ключевые слова: цифровой двойник, лесное машиностроение, цифровые технологии, моделирование, жизненный цикл изделия, проектирование.

УДК 621.7

Разделы рубрикатора ГРНТИ 55.13.17

К ОЦЕНКЕ НАПРАВЛЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ЛЕСНЫХ МАШИН

**Трубников В.В., Марков В.А., Зверев И.А., Трофимов А.В.,
Просвирина Д.А.**

Введение.

Функциональные свойства и долговечность несущих и других функциональных элементов лесных машин обеспечиваются, в значительной степени, широким применением железоуглеродистых сплавов, которые являются химически активными материалами и подвержены коррозионному разрушению вследствие воздействия неблагоприятных факторов внешней среды. Эксплуатация лесных систем проходит в условиях, связанных с повышенной влажностью и знакопеременными температурами, при движении машин происходят многочисленные контакты с препятствиями, что вызывает появление царапин и отслоения различных покрытий. Совокупное воздействие факторов ведет к интенсивным окислительным реакциям, вызывающим разрушение металла.

Явление приводит к существенным экономическим потерям для отраслевого комплекса (порядка 40 % затрат на проведение работ по восстановлению лесной техники и её простои) [1,2]. Около 70...80 % отказов лесных машин возникают вследствие совместного действия коррозионного и механического изнашивания.

Понимание процессов коррозии и наиболее эффективных методов защиты является важной задачей для лесной отрасли, так как это позволяет продлить срок службы конструкций и снизить затраты на их обслуживание и ремонт.

Цель работы – оценить место коррозии несущих элементов лесных машин в повышении эффективности применения технических систем, выделить наиболее эффективные варианты снижения негативного воздействия, предварительно оценить наиболее рациональные методы защиты.

Методы исследования.

Использованы методы сбора и обработки информации: о видах коррозии, механизмах ее протекания; причинах возникновения; последствиях и способах защиты; практики использования антикоррозийных покрытий (металлических, неметаллических, химических

и альтернативных) применительно к лесному машиностроению; результаты экспериментальных исследований.

Результаты исследования.

Представленный анализ базируется на литературных источниках о видах коррозии металлов и сплавов, механизмах ее протекания, причинах возникновения, последствиях и способах защиты применительно к лесному машиностроению. Для выявления причин возникновения и развития коррозии в элементах конструкции лесных машин, проведён анализ существующей классификации коррозионных процессов, выделены основные виды, характерные для условий эксплуатации лесной техники [3,4].

В табл. 1 представлено распределение элементов конструкции лесных машин с указанием типовых представителей по видам коррозионного разрушения и причинам его возникновения.

Характерным видом для конструктивных элементов лесных машин является *атмосферная коррозия*. Скорость разрушения металла от атмосферной коррозии во многом зависит от влажности воздуха, его химического состава и температуры [5]. В процессе взаимодействия лесных машин с предметом труда, осуществлении технологических переездов под пологом леса и пр., происходит постепенное изнашивание лакокрасочных покрытий наружных элементов, в частности – кабин операторов техники. В результате, появляются участки металла, которые лишены защиты от воздействия влаги и постепенно подвергаются коррозионному разрушению.

Стратегия обеспечения коррозионной защиты лесной техники должна начинаться уже на этапе конструкторско-технологической разработки проектируемых машин, а также включать в себя и способы восстановления работоспособного состояния элементов конструкции, которые уже были подвергнуты воздействию коррозии в процессе эксплуатации.

Защита от атмосферной коррозии начинается с периода хранения и заключается, в основном, в нанесении консервационных составов. В качестве покрытий могут использоваться: пластичные смазки, жидкие масла, преобразователи ржавчины с ингибирующими добавками, защитные восковые дисперсии, бензинобитумные составы и др. [6]. Защитные свойства составов, наиболее часто, обеспечиваются только на период хранения техники.

Таблица 1. Распределение элементов конструкции лесных машин по видам коррозии

Вид коррозии	Причины возникновения	Элементы конструкции лесных машин	Типовые представители
Газовая	Воздействие высокотемпературных продуктов сгорания топлива	Цилиндро-поршневая группа ДВС, система выпуска отработанных газов	Поршни, клапана, гильзы цилиндров, глушитель и др.
В жидких неэлектролитах	Воздействие гидравлического масла	Гидропривод лесных машин и технологического оборудования	Штоки и гильзы гидроцилиндров, плунжеры гидронасосов и моторов и др.
В жидких электролитах	Эксплуатация лесных машин в болотистой местности	Несущие элементы, ходовой системы	Рамы тракторов и автомобилей, опорные катки, ступицы колес и др.
Атмосферная	Воздействие воздушной среды при эксплуатации и хранении машин	Кабины операторов, технологическое оборудование, ходовая система, несущие элементы	Стрела и рукоять манипуляторов, рамы машин, корпуса рабочих органов и др.
Почвенная	Взаимодействие металла с влагой и химическими элементами содержащимися в почве	Технологическое оборудование лесохозяйственной техники, ходовая система	Лемехи плугов, фрезы культиваторов, траки гусеничных машин и др.
Биологическая	Воздействие на металл продуктов жизнедеятельности микроорганизмов	Резервуары для хранения топлива и масла	Топливный бак, гидробак, топливный насос и др.
Контактная	Контакт поверхностей металлических деталей с разным электродным потенциалом	Шарнирные сочленения манипуляторов, крепежные элементы	Пальцы, втулки, проушины, болты, гайки, шпильки и др.

Исследованиями установлено, что на этапах изготовления (и соответственно эксплуатации) несущих элементов и при восстановлении

изношенных, в результате воздействия коррозии поверхностей, наиболее эффективным и экономически целесообразным можно считать *применение сочетания металлического покрытия, нанесенного методом холодного газодинамического напыления и классического лакокрасочного покрытия.*

Рассмотрим наиболее популярные методы нанесения различных типов покрытий для повышения коррозионной стойкости несущих конструкций лесных машин (рам и кузовных элементов).

Металлические антикоррозийные покрытия искусственно создают на поверхности защищаемого изделия слой металла с целью защиты от коррозии. Роль покрытия, как средства защиты, сводится, в основном, к изоляции металла от внешней среды. Помимо защиты от коррозии, покрытия могут придать деталям лесных машин дополнительные полезные свойства, такие как твердость, износостойкость, а также декоративные качества. Существует множество методов нанесения покрытий на поверхности деталей, к ним относятся гальваника, наплавки, напыление и множество других [7].

Для нанесения покрытий крупногабаритных деталей машин (таких как рама) наиболее предпочтительным является напыление, так как наплавки в основном применимы для тел вращения, а гальваника сложна, к тому же требует ванн большого размера и соблюдения ряда экологических норм. Напыление имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами, такие как простота и мобильность установок, возможность автоматизации процесса, низкая технологическая себестоимость и возможность создавать покрытия относительно большой толщины с заданными физико-механическими свойствами.

Перспективным способом напыления стальных деталей является холодное газодинамическое напыление (ХГН) порошковых композиционных материалов. Процессе происходит при минимальном негативном воздействии на восстанавливаемую поверхность за счет щадящих температур (около 400°C). В качестве порошковых материалов могут выступать алюминий, цинк, медь, хром и другие металлы, а также их композиции.

Выбор метода нанесения защитного антикоррозионного покрытия является сложной задачей для машиностроительного производства. Необходимо учитывать специфику эксплуатации машины, технологические особенности производства, экологические нормы и экономическую целесообразность принятых решений. По мнению авторов, для несущих элементов и некоторых кузовных деталей лесных машин целесообразно применение сочетания металлического покрытия, нанесенного методом

холодного газодинамического напыления и классического лакокрасочного покрытия (рис.1).

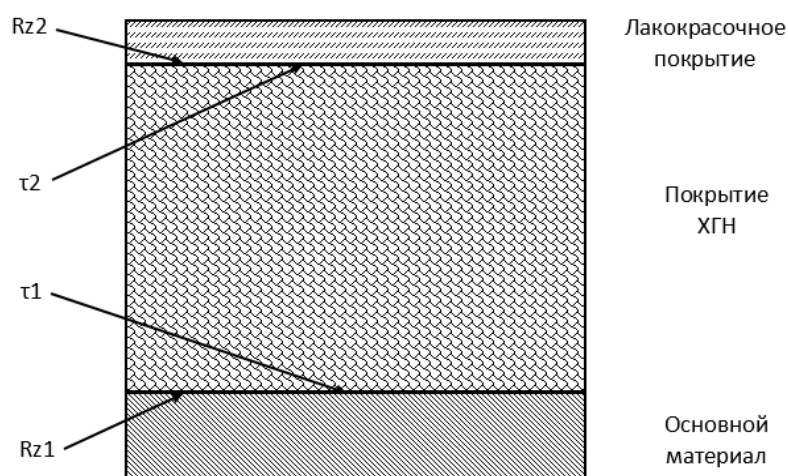


Рис. 1. Схема поверхностей, образованных сочетанием методов холодного газодинамического напыления и классического лакокрасочного покрытия

Заключение.

1. Выполненный комплекс работ показал, что проблема коррозионного разрушения конструктивных элементов лесных машин является значимой и требует комплексного подхода для ее решения.

Вопросы защиты от коррозии должны обеспечиваться не только при эксплуатации, но и на этапах конструкторской и технологической подготовки производства.

2. На сегодняшний день сформировалось достаточно точное представление о видах коррозии, механизмах ее протекания, причинах, последствиях и способах управления негативным эффектом. Актуальными представляются исследования направленные на:

- совершенствование методик расчета прочности элементов конструкций лесных машин, учитывающих возможные коррозионные процессы в технических системах;
- разработку новых, маловосприимчивых к коррозии конструкционных материалов, обладающих необходимыми для лесных машин механическими, технологическими и эксплуатационными свойствами;
- повышение уровня автоматизации по нанесению защитных покрытий, как при изготовлении, так и в условиях ремонтных производств.

3. Для несущих элементов и некоторых кузовных деталей лесных машин целесообразно применение сочетания металлического покрытия,

нанесенного методом холодного газодинамического напыления и классического лакокрасочного покрытия.

4. Проведённые исследования показали, что для стальных элементов конструкции лесных машин наиболее предпочтительными являются композиционные покрытия на основе цинка и алюминия. Полученные результаты могут быть объяснены тем, что цинк и алюминий являются протекторами т.е. обладают высокой химической активностью, благодаря чему именно они вступают в окислительно-восстановительные реакции. Это приводит к образованию прочных и сплошных оксидных пленок, которые предохраняют материал от дальнейшего взаимодействия с агрессивной средой.

5. Частичная автоматизация является наиболее рациональным решением для процесса нанесения защитного покрытия методом холодного газодинамического напыления в условиях ремонтных предприятий лесной отрасли. В условиях машиностроительного предприятия, может быть применен более высокий уровень автоматизации.

Библиографический список

1. *Голубев М.И.* Новые материалы для защиты лесных машин от коррозии // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник, 2013. – №1. – С. 40–41.

2. *Быков В.В., Голубев М.И.* Эффективность наноматериалов на основе отходов производства растительных масел для защиты лесных машин от коррозии при хранении // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник, 2012. – № 7. – С. 136-137.

3. *Петрова Л.Г., Тимофеева Г.Ю., Демин П.Е., Косачев А.В.* Основы электрохимической коррозии металлов и сплавов: учеб. пособие; под общ. ред. Г.Ю. Тимофеевой. – Москва: МАДИ, 2016. – 148 с.

4. *Хамидов О.И.* Процесс коррозии металлов боевых и мобильных машин: Классификация коррозионных процессов и виды коррозионного разрушения // Научные исследования XXI века, 2022. – № 1(15). – С. 81-85.

5. *Вигдорович В.И., Шель Н.В., Крылова А.Г.* Особенности атмосферной коррозии металлов // Вестник ТГУ, 2001. – Т. 6. – № 3. – С. 279-289. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-atmosfernoy-korrozii-metallov/viewer> (дата обращения: 25.02.202).

6. *Голубев М.И.* Эффективность консервационных составов для защиты лесных машин от коррозии при хранении на открытых площадках //

Труды международного симпозиума «Надежность и качество», 2012. – Т. 2. – С. 172.

7. *Гайдар С.М.* Теория и практика создания ингибиторов коррозии для консервации сельскохозяйственной техники: монография. – Москва: ФГНУ «Росинформагротех», 2011. – 304 с.

Сведения об авторах

ФИО	Трофимов Александр Викторович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	8933-0230
e-mail	agregat9@yandex.ru

ФИО	Зверев Игорь Андреевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	1126-2121
e-mail	igorzv1997@gmail.com

ФИО	Просвирина Дарья Алексеевна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	dashaprosvirina02@gmail.com

ФИО	Трубников Виктор Валерьевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
Адрес организации	191186, ул. Большая Морская, д. 18, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	3756-3397
e-mail	mactor85@mail.ru

ФИО	Марков Виктор Александрович
Организация	Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
Адрес организации	191186, ул. Большая Морская, д. 18, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	1503-7932
e-mail	mactor85@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрены основные виды коррозии элементов конструкций лесных машин и причины их возникновения в условиях эксплуатации. Проведён анализ методов антикоррозионной защиты и дана оценка их эффективности. Обоснована целесообразность применения комбинированных покрытий на основе холодного газодинамического напыления и лакокрасочных материалов для повышения коррозионной стойкости и долговечности несущих элементов лесной техники.

Ключевые слова: коррозия, лесные машины, антикоррозионная защита, холодное газодинамическое напыление, защитные покрытия.

УДК 621.793: 630.36

Разделы рубрикатора ГРНТИ 55.13.17

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАГРУЖЕННОСТИ КОЛЕСНОГО ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО ТРАКТОРА

Садыков Р.Ф., Байлов К.А., Кривоногова А.С., Пушков Ю.Л.

Введение.

Повышение качества и надежности лесопромышленных тракторов – один из основных источников увеличения эффективности их эксплуатации [1].

Цель работы – анализ эксплуатационных испытаний колесных лесопромышленных тракторов и их влияние на основные показатели надежности.

Методы и результаты исследования.

Информацию о надежности тракторов получают двумя способами. Первый – наблюдение за работой машин в реальных условиях эксплуатации – самый достоверный, но и наиболее дорогостоящий, трудоемкий и длительный, так как результаты получают через 3-4 года после начала выпуска машин. Кроме того, показатели надежности в этом случае во многом зависят от культуры эксплуатации машин и соблюдения норм технического обслуживания [2].

Более достоверные результаты получают при испытаниях тракторов в специализированных организациях. Информация о надежности обеспечивается моделированием эксплуатационных процессов нагружения, а также форсированными испытаниями.

Ускоренные испытания проводят на полигоне с искусственным покрытием или естественным фоном совмещением нормальных испытаний с имитацией или увеличением частоты приложения эксплуатационных разрушающих воздействий [1, 3].

При моделировании исходными данными для разработки методик испытаний машин на надежность служат режимы работы трактора в условиях эксплуатации, которые включают в себя характеристики и интенсивность его использования, а также нагруженность элементов при выполнении основных видов работ [4].

Критерий правильности выбора режима нагруженности при испытаниях – совпадение вида и характера основных отказов, износов и неисправностей при испытаниях и эксплуатации [1].

Характеристики интенсивности использования агрегатов лесопромышленного трактора – совокупность данных об условиях нагружения, частоте и продолжительности их применения в процессе

выполнения основных видов работ технологического цикла (количество включений передач, муфты сцепления, тормоза, повороты рулевого колеса и работы технологического оборудования) [5].

При исследовании силового нагружения в реальных условиях трактор рассматривают как динамическую систему с входными и выходными переменными [6].

К первым относятся микропрофиль полей и дорог, тяговое сопротивление на крюке трактора, силы сопротивления его движению и управляющие воздействия, ко вторым – технологические и энергетические параметры (определяют технико-экономические показатели) и параметры динамического нагружения (режимы работы агрегатов, их работоспособность и долговечность).

Режим работы изделия в эксплуатации, соответствующий заданным типичным условиям его использования, в сочетании с требуемым ресурсом является общей основой всех этапов создания машины — конструирования, расчета, испытания и доводки. Информация, полученная в результате кратковременных испытаний макетных образцов, позволяет обоснованно проводить дальнейшие работы по доводке конструкции машины и назначать режимы испытаний его узлов и деталей [7].

Принципиальная схема системы испытаний и доводки конструкции новых и модернизированных моделей тракторов показана на рис. 1.

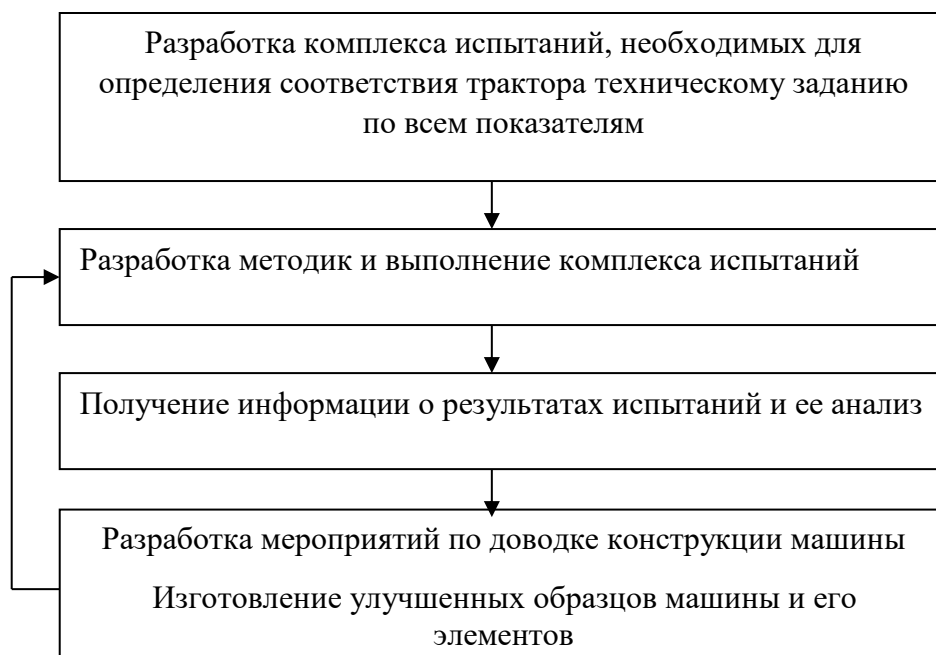


Рис. 1. Принципиальная схема системы испытаний и доводки конструкции машин новых и модернизированных моделей

При лабораторно-полевых испытаниях проверяют соответствие техническому заданию опытных тракторов, изготовленных после уточнения отдельных его параметров и доработки конструкции по результатам испытания макетного образца. Испытания проводят в объеме, позволяющем дать всестороннюю оценку всем основным показателям трактора, за исключением выявляемых при длительной его эксплуатации (показателей надежности) [8].

Лабораторно-полевым испытаниям подвергают не менее двух тракторов. Один из них оснащают тензометрическими узлами для исследования нагрузок в основных элементах. На этой же машине целесообразно проводить исследования плавности хода с одновременными замерами нагруженности деталей несущей и ходовой систем, определение тяговых характеристик с одновременным исследованием потерь в различных элементах трансмиссии и ходовой системы (определение тягового баланса) и выполнять другие работы, связанные с тензометрическими измерениями.

На другом тракторе исследуют агрегатируемость, проходимость, управляемость, определяют оптимальные режимы работы машинно-тракторного агрегата, исследуют условия труда оператора и т. д.

Эксплуатационные испытания подразделяются на испытания в нормальных условиях эксплуатации, ускоренные испытания приспособленности тракторов к действительным условиям эксплуатации и хозяйственные испытания партии тракторов в различных зонах страны.

При проведении испытаний лесохозяйственных машин необходимо руководствоваться требованиями, которые включает в себя основные положения, типовую программу и методику проведения испытаний.

При разработке рабочей программы и методики испытаний конкретной машины типовая программа и методика должна уточняться (дополняться и конкретизироваться) в зависимости от видов и целей испытаний, видов рубок ухода и трелюемой древесины, условий эксплуатации для которых предназначена машина, а также специфики конструктивного устройства машины [1-2, 9, 10].

Рабочая программа и методика испытаний [1, 4, 7, 10]:

- не должна противоречить обязательным требованиям действующих стандартов, метрологических норм и правил, технических заданий, технических условий и нормативов, распространяющихся на испытываемую машину;

- должна обеспечивать достоверность и точность результатов испытаний по всем показателям и требованиям качества, установленным

документами на соответствие которым проводятся испытания машины (стандарт, ТЗ на НИР, ТЗ на ОКР, ТУ);

- должна устанавливать единые методы определения показателей качества и характеристик машины на протяжении всего ее жизненного цикла независимо от вида испытаний и обеспечивать воспроизводимость результатов всех видов испытаний машины.

При выполнении ряда испытаний обслуживающий персонал должен иметь квалификацию, соответствующую выполняемой работе, быть подготовленным к техническому обслуживанию машины и иметь опыт эксплуатации аналогичных машин [4, 10].

Материалы, топливо, масла и охлаждающие жидкости, применяемые при испытаниях, должны пройти входной контроль на соответствие требованиям нормативной документации.

При испытаниях должны выполняться требования безопасности, эксплуатационной документацией на машину, документацией на испытательное оборудование, средства измерения, топливо, масла и охлаждающие жидкости.

Среднюю наработку на отказ T_o , ч. определяют по формуле:

$$T_o = \frac{T_H}{N_o}, \quad (1)$$

где T_H – суммарная наработка машины за период ее испытаний в часах основной работы;

N_o – суммарное число отказов за период испытаний машины.

При испытаниях нескольких образцов машины среднюю наработку на отказ определяют по формуле:

$$T_o = \frac{T_H}{n}, \quad (2)$$

где n – количество испытанных образцов машин.

Коэффициент технического использования $K_{ти}$ рассчитывают по формуле:

$$K_{ти} = \frac{T_H}{T_{yo} + T_{то} + T_H}, \quad (3)$$

где T_{yo} – суммарная трудоемкость устранения всех возникших при испытаниях отказов, чел.ч;

$T_{то}$ – суммарная трудоемкость всех видов технического обслуживания за период испытаний, чел.ч

При испытаниях нескольких образцов машины коэффициент технического использования определяют по формуле:

$$K_{ти} = \frac{T_H}{n}. \quad (4)$$

Удельную суммарную оперативную трудоемкость технических обслуживаний $S_{\text{ТО}}$, чел.ч./ м³, определяют по формуле:

$$S_{\text{ТО}} = \frac{T_{\text{ТО}}}{T_{\text{см}} \cdot W_{\text{см}}}, \quad (5)$$

где $T_{\text{см}}$ – суммарная наработка машины за период ее испытаний в часах сменного времени;

$W_{\text{см}}$ – производительность машины за час сменного времени, м³.

Удельную металлоемкость определяют методом расчета, как частное от деления конструкционной массы машины на ее производительность за час сменного времени.

Удельный расход топлива определяют методом расчета, как частное от деления часового расхода топлива на производительность машины за час сменного времени. Удельную суммарную оперативную трудоемкость эксплуатации, $S_{\text{ТЭК}}$, чел.ч. /м³ определяют по формуле:

$$S_{\text{ТЭК}} = \frac{m}{W_{\text{ЭК}}}, \quad (6)$$

где m – количество обслуживающего персонала, чел;

$W_{\text{ЭК}}$ – производительность машины за час эксплуатационного времени.

Анализ результатов испытаний машины проводят методом сравнения фактических значений показателей и характеристик, полученных при испытаниях, с показателями и характеристиками, установленными документацией, на соответствие которой проведены испытания, а также с показателями и характеристиками аналога (при проведении сравнительных испытаний).

На основании данных анализа формируются выводы и рекомендации по результатам испытаний машины.

Объем и содержание опытно-конструкторских работ, проводимых в ходе заводских испытаний, должны быть достаточными для гарантии того, что показатели трактора, полученные в результате доводки опытных образцов будут обеспечены на машинах серийного производства в действительных условиях эксплуатации [1, 4, 8].

Такая задача при налагаемых ограничениях может быть решена только при использовании наиболее эффективных методов испытаний и оценки их результатов, а также рациональной организации всего комплекса опытно-конструкторских работ.

Никакая, даже самая совершенная система доводочных испытаний сложных изделий при ограниченном количестве опытных образцов и времени, отводимого на их испытания, не может обеспечить выявление и устранение всех недостатков создаваемых машин до начала их

производства. Доработка конструкции машины в ходе серийного производства вызванная необходимостью устранения отдельных его недостатков, неизбежна. Однако конструктивная доведенность машины до постановки его на производство должна быть настолько высокой, чтобы объем работ, связанных с устранением дефектов, выявляемых в процессе серийного производства, был минимальным, и чтобы при этом не снижались технико-экономические показатели машины [1, 6, 8].

Применяемые до настоящего времени методы эксплуатационных испытаний не позволяют полностью выявить основные показатели надежности опытных тракторов и своевременно устранить обнаруженные конструктивные недостатки. Такие испытания, проводимые в условиях нормальной эксплуатации, не дают полного представления о технико-экономических и эксплуатационных качествах трактора [2, 4, 7].

Это объясняется существенным отличием условий проведения эксплуатационных испытаний от действительных условий эксплуатации изделий [3, 5]. Кроме того, как было сказано выше, доводочным испытаниям обычно подвергается ограниченное число машин, вследствие чего в условиях только нормальной эксплуатации не удастся получить с требуемой достоверностью значения основных показателей надежности, а также выявить все элементы конструкции, не имеющие достаточного запаса эксплуатационной надежности.

Заключение.

Таким образом, рациональная система заводских доводочных испытаний опытных моделей машин должна обеспечивать выявление и устранение большинства недостатков и отказов, являющихся результатом конструкторских просчетов, а также отказов, вызываемых характерными отклонениями от правил эксплуатации тракторов потребителями. В связи с этим к числу важнейших задач должно относиться не только повышение надежности серийной продукции, но и «профилактика» качества, то есть. разработка и практическое применение системы опытно-конструкторских и исследовательских работ по доводке конструкции опытных моделей машин [1-4, 7-9].

Библиографический список

1. Добрынин Ю.А., Пушков Ю.Л., Кривоногова А.С. Организация диагностирования лесных машин // Леса России: политика,

промышленность, наука, образование: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 615-617.

2. *Кривоногова А.С., Пушков Ю.Л.* Новые принципы безразборной диагностики механизмов и систем двигателя // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 645-648.

3. *Котлов Д.П., Кривоногова А.С., Пушков Ю.Л.* Методика определения технического состояния узлов трения лесных машин // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 631-633.

4. *Пушков Ю.Л.* Оценка влияния конструктивных особенностей колесного трелевочного трактора и предмета труда на тормозные свойства трактора // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2005. – Вып. 175. – С. 101-115.

5. *Пушков Ю.Л., Кривоногова А.С., Добрынин Ю.А., Садыков Р.Ф., Байлов К.А.* Особенности рабочего процесса адиабатных двигателей и перспективы применения на лесотранспортных машинах // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2023 года. – Санкт-Петербург, 2024. – С. 280-289.

6. *Клечков И.Р., Пушков Ю.Л., Кривоногова А.С.* Оптимизация периодичности проведения работ по техническому обслуживанию и контролю гидрораспределителя лесных машин // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 628-630.

7. *Добрынин Ю.А., Пушков Ю.Л., Кривоногова А.С.* Методика диагностики гидравлических приводов лесных машин // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 612-614.

8. *Охапкин Т.А., Пушков Ю.Л., Кривоногова А.С.* Оценка потенциальных свойств двигателя на эксплуатационную эффективность работы лесопромышленного трактора // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 654-657.

9. *Пушков Ю.Л.* Улучшение тормозных свойств колесных лесопромышленных тракторов путем обоснования технических решений и параметров тормозной системы: диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук (05.21.01). – Санкт-Петербург: СПбГЛТА им. С.М. Кирова, 2003. – 153 с.

10. *Кочнев А.М., Кривоногова А.С., Пушков Ю.Л.* Обоснование коэффициентов совместной работы дизельного двигателя и гидромеханической трансмиссии колесного трелевочного трактора // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2023. – № 245. – С. 235-243.

Сведения об авторах

ФИО	Садыков Руслан Фарходович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	sadykovvv@mail.ru

ФИО	Байлов Константин Алексеевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	4916-5464
e-mail	kostya.baylov@yandex.ru

ФИО	Кривоногова Александра Станиславовна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	8399-6121
e-mail	krivonogovaas@spbftu.ru

ФИО	Пушков Юрий Леонидович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	5633-1797
e-mail	pushkovyl@spbftu.ru

Аннотация

Анализ существующих испытаний колесных лесопромышленных тракторов, дана оценка влияния эксплуатационных испытаний на технико-экономические показатели работы машин.

Ключевые слова: Испытание машин, опытно-конструкторские работы, эксплуатационная надежность, опытные модели машин, показатели, характеристики.

УДК 62-2:62-94+62-97/-98

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.17.15, 66.17.99

СБОРКА СЛОИСТЫХ ПАКЕТОВ ИЗ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Бирман А.Р., Козловская К.А., Угрюмов С.С.

Введение.

Одним из видов широко используемой продукции деревообрабатывающих предприятий являются столярные плиты [1,2], выпускаемых в соответствии с ГОСТ 13715-78 «Плиты столярные. Технические условия». Механические свойства столярных плит характеризуются эксплуатационной прочностью, которая зависит от их конструкции, размеров и породы древесины несущих реек, типа клея и режима склеивания сборочных единиц.

Наибольшее применение имеют столярные плиты с реечным средним слоем, оклеенным с двух сторон лущеным шпоном или тонкой фанерой. При изготовлении таких плит применяются рейки хвойных и лиственных пород из пиломатериалов 3-го и 4-го сортов. Конструкция таких столярных плит представляется наиболее технологичной. Пакет можно собирать в виде непрерывной ленты на прессах проходного типа с последующим его делением на плиты требуемого формата [3,4].

Кроме реек из пиломатериалов в конструкции внутреннего слоя слоистых плит можно использовать рейки, полученные при обрезке или раскросе различных древесных материалов или измельченные древесные отходы [5-7]. Так, при производстве фанеры общего назначения неизбежно образуются различные древесные отходы, в том числе рейки от форматной обрезки, ширина которых составляет от 2 до 3,5 см в зависимости от формата выпускаемой продукции. Доля данных отходов составляет от 7 до 9% от объема не обрезной фанеры [8,9]. Использование реек от форматной обрезки фанеры при формировании внутреннего слоя столярных плит позволит эффективно перерабатывать образующие отходы с выпуском облегченного материала, снизить себестоимость выпускаемой продукции. Производство подобных столярных плит может быть организовано непосредственно в условиях основного фанерного производства.

Однако при монтаже несущих столярных плит на лагах, параллельных рейкам внутреннего слоя, вертикальная (например, весовая) нагрузка

разрушит пакет при совпадении вертикальных плоскостей стыков боковых кромок реек с плоскостью силовой нагрузки, так как между боковыми кромками реек нет клеевой связи, обеспечивающей их неразъемность. Указанный недостаток в наибольшей степени проявляется при использовании в качестве внутренних слоев плитных конструкций реек, полученных в результате торцовки отходов форматной обрезки фанерной продукции. Ширина просветов в плане при укладке таких реек может достигать 5...8 мм. Следует учитывать, что боковые смещения отдельных листов шпона при их сборке в склеиваемый пакет на практике не регламентированы.

Вероятность совпадения горизонтальных координат вертикальных плоскостей боковых кромок реек является случайной величиной и имеет место при формировании пакета плиты [10].

Цель работы.

Целью работы является разработка конструкции столярной плиты с внутренним слоем на основе различных реек (реек из пиломатериалов, реек от форматной обрезки фанеры), обеспечивающей высокую несущую способность, а также конструктивного оформления процесса формирования столярной плиты с внутренним слоем на основе реек.

Методы исследования.

Предметом проведенного исследования является конструкция питателя для линии сборки слоистых пакетов (столярных плит), наружные слои которых состоят из двух и более листов лущеного шпона, а внутреннее заполнение выполнено из древесных реек или реек от форматной обрезки фанеры. Проектирование питателя осуществлялось с учетом технологических, организационных и экономических аспектов.

Результаты исследования.

Для повышения несущей способности столярных плит предлагается формирование их внутреннего слоя из сплошного ряда параллельных калиброванных реек, развернутых относительно направления вектора перемещения пакета в процессе его сборки на угол α , минимальная величина которого ограничена и определяется соотношением $\operatorname{tg}\alpha = b/l$, где b – ширина реек, l – длина реек, а максимальная величина угла α равна 45° . Параметрами, определяющим величину минимального угла α , являются геометрические размеры плоскости реек, склеиваемых с листами шпона облицовочного покрытия. В табл. 1 приведены численные значения минимального угла поворота реек (определяемые через $\operatorname{tg}\alpha = b/l$) в зависимости от их геометрических параметров [10].

Табл. 1. Величина минимального угла α , град.

Ширина реек b , мм	Длина реек l , мм			
	400	600	800	1200
20	2,83	1,92	1,42	0,92
40	5,75	3,75	2,92	1,92
50	7,10	4,75	3,35	2,42

Поворот реек является достаточно сложной технической задачей. Ранее проведенные расчеты позволяют рекомендовать на практике выполнять поворот реек основания на угол $(\alpha+5...7^\circ)$ [11].

В деревообрабатывающей промышленности на линиях изготовления столярных плит подача реек, формирующих их внутренние несущие слои, осуществляется с помощью питателей с размещением запаса реек в вертикальных магазинах. При этом наиболее часто используются магазинные питатели с цепными механизмами подачи реек в ряд с помощью упоров, установленных на цепях конвейеров [4] (рис. 1).

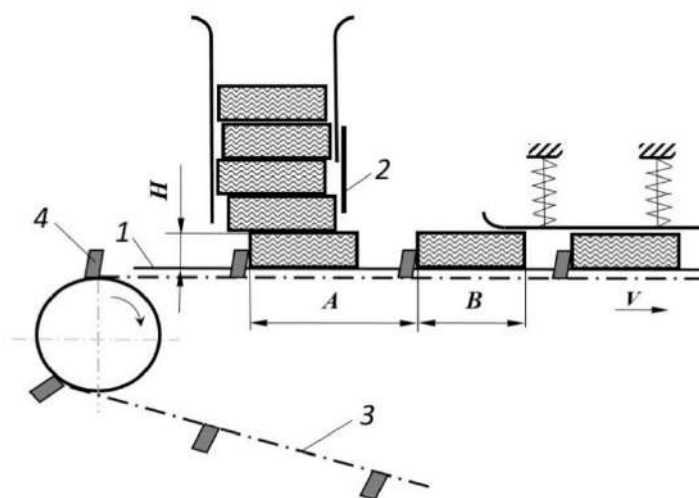


Рис. 1. Магазинный питатель с упорами на цепях:
1 – направляющие, 2 – шторка, 3 – цепи, 4 – упоры

В таких питателях нижняя в вертикальном запасе рейка лежит на направляющих 1, упоры 4 установлены на звеньях цепей 3. Размеры выходного окна питателя регулируются вертикальным перемещением шторки 2. Шаг A между упорами должен быть несколько большим ширины B рейки, так как последующая рейка выпадает на направляющие через период времени t после предыдущей. Тогда расстояние $A-B$ должно быть

больше или равно величине vt , где v – скорость движения цепей, а t – продолжительность падения рейки из магазина на направляющие [12].

Однако в линиях по производству облицованных шпоном реечных столярных плит вышеописанные питатели не могут быть использованы, так как перемещение упоров, расположенных на тяговых органах конвейеров, перемещающихся в вертикальной плоскости, приведет к тому, что упоры будут «резать» нижний облицовочный лист шпона, имеющий ширину, равную длине используемых реек [13].

Поэтому технической задачей при проектировании линии сборки пакетов из древесных материалов со встроенным вертикальным магазинным питателем являлось создание такого устройства, которое позволит использовать в конструкции пакетов облицовочные листы шпона, равные по ширине величине длины реек, формирующих внутренние слои пакета, а так же организовать процесс подачи реек под углом к направлению движения конвейеров и упростить сборку пакетов с неограниченным числом внутренних реечных слоев, в которых рейки смежных слоев повернуты относительно друг друга.

Новая линия должна включать ранее известные элементы, а именно: механизмы подачи облицовочных листов шпона (нижнего и верхнего), механизмы нанесения клея, а также модернизированный питатель с механизмом подачи реек с их поворотом на заданный угол α по отношению к вектору скорости перемещения технологического потока сборки пакета. Это может быть осуществлено при оснащении питателя плоским днищем, верхняя поверхность которого является опорой для уложенных в питатель реек. Между нижней поверхностью днища и цепями конвейеров должен быть просвет, в котором перемещаются цепи конвейеров расположенные в одной горизонтальной плоскости. Центры ведущих звездочек конвейеров следует располагать на линии, повернутой на заданный угол α относительно положения питателя. Контактные с рейками точки упоров на цепях противоположных конвейерах должны быть смещены относительно друг друга на величину S , равную:

$$S = K \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

где K – расстояние между параллельными векторами перемещения контактных с реками точек упоров, расположенных на противоположных конвейерах; α – заданный угол наклона реек.

Конвейеры должны быть выполнены с возможностью их относительного смещения в направлении параллельном направлению движения технологического потока сборки пакета. При сборке пакета с более чем одним внутренним слоем реек линия может быть оснащена более

чем одним магазинным питателем с парой механизмов подачи реек из питателя. При этом последующие питатели устанавливаются выше предыдущих питателей на величину толщины используемых реек.

Техническое решение иллюстрируется рис. 2.

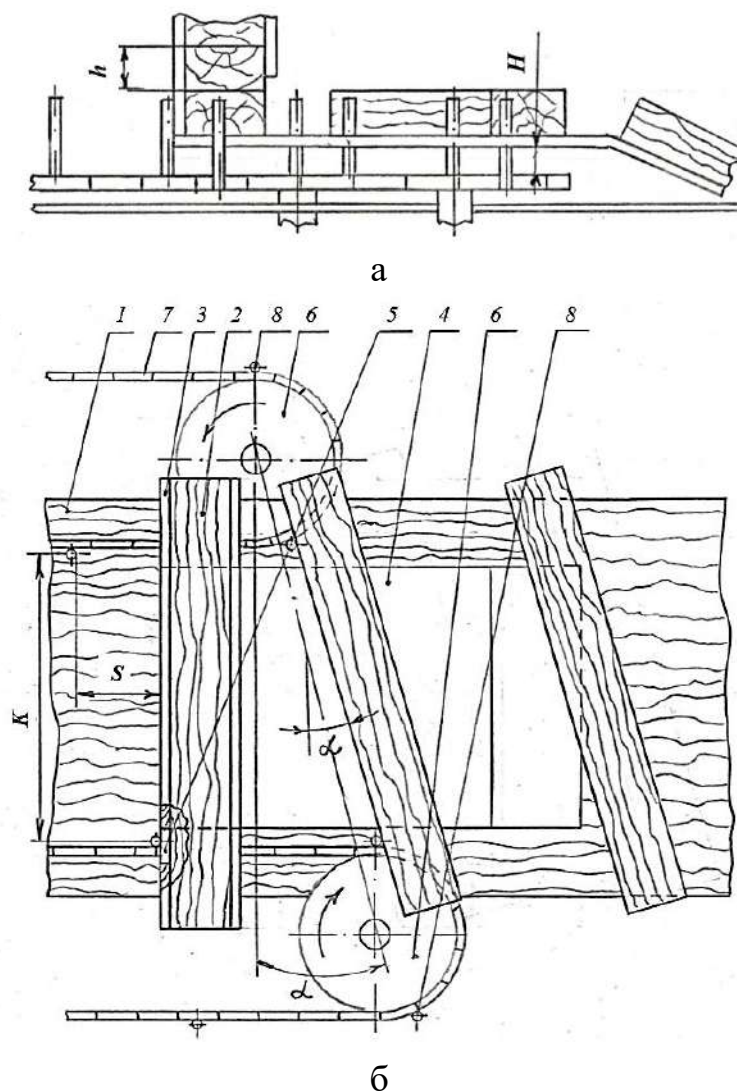


Рис. 2. Схема устройства сборки пакетов столярной плиты с наклонным расположением реек во внутренних слоях,

а – вид спереди; б – вид сверху:

- 1 – лист шпона; 2 – рейки; 3 – вертикальный питатель; 4 – горизонтальное днище; 5 – вертикальные прорези; 6 – ведущие звездочки; 7 – пластинчатые цепи; 8 – упоры

Выполнение питателя с горизонтальным днищем позволяет разместить в просвете (высотой H) между его нижней плоскостью и нижним облицовочным листом шпона конвейеры подачи реек из питателя. При этом

горизонтальное расположение цепей конвейеров обеспечивает их свободное перемещение над листом шпона.

Расположение центров ведущих звездочек пары конвейеров на линии, повернутой на угол α относительно положения питателя, обусловлено тем, что противолежащие упоры конвейеров, одновременно выходя из контакта с выдвинутой из питателя и повернутой на угол α рейки, огибают ведущие звездочки, не изменяя заданный угол наклона рейки.

Величина смещения упоров на противолежащих конвейерах на величину S определяется приведенной в формуле зависимостью. Она легко вычисляется умножением значения $tg\alpha$ на величину расстояния между контактными с рейкой точками упоров (величина K), расположенных на противолежащих конвейерах. Связь величин S и K при заданном угле α определяет геометрические параметры как при установке упоров на цепях конвейеров, так и их взаимное расположение в механизме подачи реек из питателя.

Выполнение конвейеров с возможностью их относительного продольного перемещения осуществляется с помощью любых известных механизмов. Продольное перемещение конвейеров необходимо при переналадке работы линии в случае изменения угла поворота реек в слое формируемого пакета.

При сборке пакетов с более чем одним внутренним слоем реек, можно встраивать в линию два и более унифицированных питателя с механизмами подачи, обеспечивая их последовательное вертикальное вверх смещение на величину равную толщине h используемых реек.

Следует отметить, что при внедрении предлагаемой модернизации возможно осуществлять перекрестное расположение реек в смежных внутренних слоях пакета путем изменения относительного расположения центров ведущих звездочек противолежащих конвейеров.

На рис. 2 механизм подачи облицовочных листов шпона 1 и механизм нанесения клея на листы шпона и рейки 2 условно не показаны. Вертикальные прорези 5 в корпусе питателя 3 обеспечивают свободное движение упоров 8 в направлении движения технологического процесса сборки пакета.

Работа линии с модернизированным питателем осуществляется следующим образом.

На линию в качестве нижнего облицовочного слоя пакета любым известным механизмом подается намазанный сверху клеем лист шпона 1. Из питателя 3 с помощью упоров 8, укрепленных на цепях 7 двух противоположных конвейеров, рейки 2, развернутые на заданный угол α ,

передвигаются по днищу 4 питателя, а затем укладываются на лист шпона 1.

Наклонное на угол α по отношению к положению питателя, расположение реек обеспечивается тем, что контактные точки упоров 8 на противоположных цепях сдвинуты относительно друг друга на величину S , которая определяется зависимостью $S = K \cdot tg\alpha$. Очевидно, что при изменении угла α будет меняться и величина S .

Величина K является постоянной для данной линии, но может меняться в аналогичной линии в случае изменения длины реек 2.

Расположение центров ведущих звездочек конвейеров на одной линии, отклоненной от положения питателя на угол α , позволяет упорам 8 в период огибания цепями 7 зубьев ведущих звездочек 6 следовать по траекториям, движение по которым не изменяет приобретенный рейками, за счет контакта с упорами, заданный угол α . Величина шага реек внутреннего слоя пакета регулируется путем установки на цепях конвейеров упоров на требуемом расстоянии друг от друга.

При дальнейшем движении технологического потока линии слой реек накрывается намазанным клеем верхним облицовочным листом шпона с помощью любых известных механизмов (этот этап на рис. 2 условно не показан).

При сборке пакетов с более чем одним внутренним слоем реек нанесение клея последовательно производится на верхнюю поверхность каждого внутреннего слоя реек за исключением поверхности последнего их слоя, а затем последний слой реек накрывается намазанным клеем верхним облицовочным листом шпона [14].

Резка полученного слоистого полотна в поперечном направлении на пакеты может осуществляться с помощью любых известных механизмов.

Выводы.

Предложенная конструкция столярной плиты с наружными слоями из лущеного шпона и внутренним заполнением на основе реек из пиломатериалов или реек от форматной обрезки фанеры позволяет обеспечить высокую прочность и несущую способность. Возвратное использование реек от форматной обрезки фанеры в основном производстве позволяет повысить степень использования древесного сырья, эффективно перерабатывать образующие отходы с выпуском конкурентоспособного материала, снизить себестоимость выпускаемой продукции.

Предложенная конструкция питателя в линии сборки пакетов из шпона и древесных материалов со встроенным вертикальным магазинным питателем позволяет организовывать подачу реек под различным углом к

направлению движения конвейеров, упростить конструкцию механизма подачи реек и упростить технологию сборки пакетов столярных плит как с одним, так и с неограниченным числом внутренних слоев из реек

Библиографический список

1. Лукаш А.А., Романов В.А., Войнаш С.А. Технология клееных материалов: учебное пособие для вузов. – Санкт-Петербург: Лань, 2025. – 148 с.
2. Меньшикова В.К. Ассортимент и качество строительных материалов и изделий: учебное пособие. – Красноярск: СибФУ, 2020. – 216 с.
3. Бобиков П.Д. Конструирование столярно-мебельных изделий. изд. 4-е, доп. – Москва: Высшая школа, 1989. – 176 с.
4. Бирман А.Р. Теоретическое и экспериментальное обоснование технологии и параметров оборудования для производства облицовочных деревянных покрытий. – Санкт-Петербург: СПбЛТА, 2001. – 156 с.
5. Свешников А.С., Угрюмов С.А. Модернизация линии по производству фанеры с внутренним слоем на основе древесных отходов // Ремонт. Восстановление. Модернизация, 2014. – № 6. – С. 13-15.
6. Угрюмов С.А., Свешников А.С. Комплексное исследование свойств композиционной фанеры // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник, 2010. – № 6. – С. 163-165.
7. Свешников А.С., Угрюмов С.А. Технология производства композиционной фанеры // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник, 2012. – № 2. – С. 148-153.
8. Волков А.В. Справочник фанерщика. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 486 с.
9. Волинский В.Н. Технология клееных древесных материалов. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – Т. 1. – 388 с.
10. Пат. 2769690 Российская Федерация, МПК E04F15/04. Паркетный щит / Н.А. Белоногова, А.Р. Бирман, А.А. Тамби, С.А. Угрюмов; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова» № 2021115480; заявл. 28.05.2021, опубл. 05.04.2022, бюл. № 10. – 8 с.
11. Белоногова Н.А., Бирман А.Р., Козлова И.К., Фролов И.С. Определение прочности двухслойных паркетных щитов с наклонным расположением реек подложки // Сборник статей по материалам научно-

технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2022 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ. 2023. – С. 256-261.

12. *Любченко В.И., Дружков Г.Ф.* Станки и инструменты мебельного производства. – Москва: Лесная промышленность, 1990. –360 с.

13. *Бирман А.Р., Тамби А.А., Угрюмов С.А., Белоногова Н.А.* Совершенствование конструкции клееного щитового паркета с увеличением его монтажной прочности // Клеи. Герметики. Технологии, 2021. № 8. – С.28-32.

14. *Угрюмов С.А., Бирман А.Р.* Клееная строительная плита // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Девятой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием. – Петрозаводск: ПетрГУ, 2023. – С. 37-38.

Сведения об авторах

ФИО	Бирман Алексей Романович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	3247-9904
e-mail	birman1947@mail.ru

ФИО	Козловская Карина Александровна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	Отсутствует
e-mail	karina.kozlovskaia@bk.ru

ФИО	Угрюмов Станислав Сергеевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	3884-9301
e-mail	ugriumov.s@yandex.ru

Аннотация

В статье рассмотрен практический вопрос формирования внутреннего слоя столярных плит из сплошного ряда параллельных калиброванных реек, развернутых относительно направления вектора перемещения пакета в процессе его сборки на угол в пределах до 45°. Спроектирована линия сборки пакетов плит со встроенным вертикальным магазинным питателем, позволяющая упростить сборку пакетов с неограниченным числом внутренних реечных слоев, в которых рейки смежных слоев повернуты относительно друг друга, упростить конструкцию механизма подачи реек и технологию сборки пакетов столярных плит как с одним, так и с неограниченным числом внутренних слоев из реек.

Ключевые слова: столярная плита, деревянные рейки, рейки от форматной обрезки фанеры, питатель, линия сборки пакетов.

УДК 674.02

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.43.99

ПРОИЗВОДСТВО ПОГОНАЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ДРЕВЕСНО-КЛЕЕВЫХ МАСС

Бирман А.Р., Угрюмов С.С., Орлов В.В.

Введение. Одной из задач деревообрабатывающей промышленности является вовлечение в переработку древесных отходов с целью экономии заготовленной цельной древесины. Поэтому направление комплексного использования древесины, включающее формование погонажных изделий из измельченной древесины смешанной со связующим является актуальным. Сырьем для таких изделий служат отходы механической обработки и отходы лесозаготовок.

Важным преимуществом формованных погонажных изделий является получение окончательных размеров изделий уже в процессе пьезообработки древесно-клеевой массы (ДКМ), обеспечение заданных физико-механических свойств и отсутствие новых отходов. Производство погонажных изделий из ДКМ уменьшает трудозатраты, позволяет рационально использовать производственные площади. Автоматизация такого производства может быть обеспечена использованием достаточно простых средств.

Степень прессования ДКМ ϵ может быть весьма высокой ($\epsilon = 0,5$) за счет содержания между частицами древесины и самой древесине значительного объема воздуха, а конечная продукция достигает плотности $0,7-1,0 \text{ г/см}^3$ за счет применения двух стадийного сжатия: подпрессовки ДКМ на начальном этапе формования и окончательного сжатия при высоком давлении в процессе конечного формования [1,2].

Для производства строительных изделий из древесно-клеевых масс используют различное прессовое оборудование позиционного или проходного типа. Изделиями являются фасонные погонажные детали, бруски для оконных и дверных блоков, мебельные заготовки [3,4] .

Недостатками известного позиционного оборудования являются его сложность, материалоемкость, трудоемкость переналадки при изменении профиля изделий.

Цель работы.

Целью работы является разработка упрощенной конструкции устройства для изготовления профильных изделий из древесно-клеевых масс за счет изменения положения оси вальца относительно направления подачи ковра стружечно-клеевой массы.

Методы исследования.

Проектирование устройства для изготовления профильных изделий из древесно-клеевых масс осуществлялось с учетом технологических, организационных и экономических аспектов.

Результаты исследований.

Известно устройство для изготовления профильных изделий из стружечно-клеевых масс, где формирование изделий происходит за счет поперечного перекатывания вращающегося вальца с профилирующими пластинами по движущемуся полотну подпрессованной древесно-клеевой массы. Механизм вращения и поперечного перемещения вальца содержит привод, кривошипно-шатунный механизм, направляющие, штангу, шестерню и зубчатую рейку, укрепленную на станине устройства [5].

Недостатками устройства являются сложность механизма возвратно-поступательного перемещения вальца, сложность изменения его скорости вращения, осуществляемого только за счет подбора параметров двигателя и редуктора, материалоемкость.

Задачей предлагаемого технического решения является упрощение конструкции устройства проходного типа для изготовления профильных изделий из ДКМ за счет изменения положения оси вальца относительно направления подачи ковра стружечно-клеевой массы. Схема предлагаемого нового устройства изображена на рис. 1 и 2.

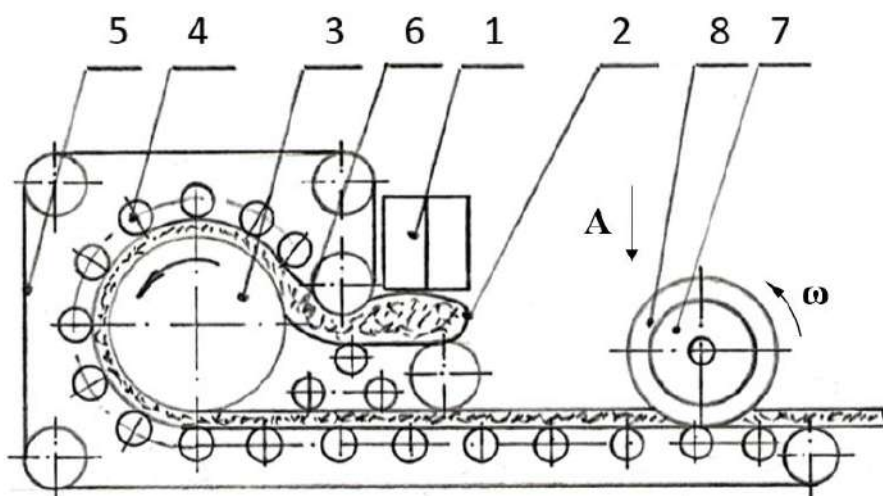


Рис. 1. Схема проходного пресса для изготовления погонажных изделий из ДКМ

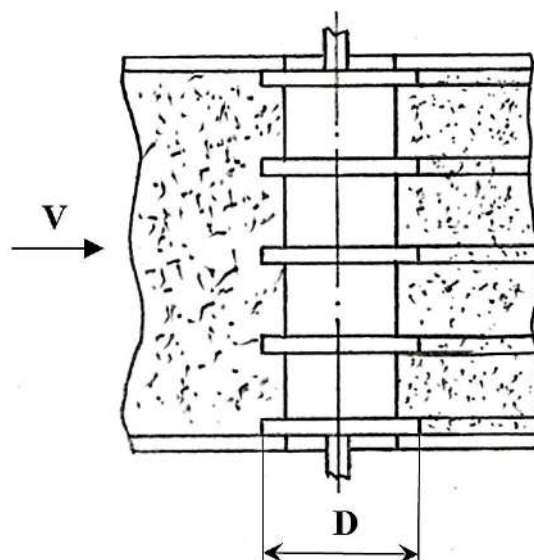


Рис. 2. Вид по стрелке А на рисунке 1

Устройство включает питатель, верхний ленточный транспортер, снабженный обогреваемым прессующим барабаном, нижний ленточный транспортер и приводной валец с профилирующими пластинами. Ось вальца перпендикулярна направлению подачи изделия, профилирующие пластины, в виде фасонных колец, расположены перпендикулярно оси вальца, при этом последний вращается от привода с угловой скоростью ω , определяемой по формуле:

$$\omega = 2 V/D, \quad (1)$$

где V – скорость перемещения нижнего ленточного транспортера;

D – наружный диаметр колец профилирующих пластин.

На выходе из прессового канала устанавливают торцовочный станок (на рис. 1 условно не показан).

Предлагаемое устройство работает следующим образом. Из питателя 1 древесно-клеевая масса поступает на ленту верхнего ленточного транспортера 2, проходит предварительную пьезотермическую обработку под воздействием прессующего барабана 3 и прессовых валков 4, нижним ленточным транспортером 5 выносится в прессовый канал, в котором подвергается пьезообработке приводным вальцом 7 и профилирующими пластинами 8. Угловая скорость ω вращения вальца 7 равна линейной скорости V движения полотна 6.

Образующая цилиндрической поверхности вальца 7 может быть расположена на верхней плоскости полотна древесно-клеевой массы или несколько ниже указанной плоскости, если необходима дополнительная подпрессовка полотна. Над сформированным полотном можно установить ряд вальцов с профилирующими пластинами с профилем, постепенно приближающимся к окончательному профилю изготавливаемой продукции. При этом вальцы 7 так же, как и барабан 3, выполнены подогреваемыми. Вальцы 7 могут быть сменными с любым новым набором профилирующих пластин. При этом при изменении параметра D приводом вальца должна быть обеспечена его иная угловая скорость ω в соответствии с зависимостью, указанной в формуле.

На выходе из устройства готовую продукцию охлаждают, выдерживают в стопах и пакетируют.

Вывод.

Использование предлагаемого технического решения позволяет изготавливать погонажную продукцию типа наличник, плинтус и т.п., а также облицовочные профильные плиты с высокими декоративными показателями.

Библиографический список

1. *Герасевич Г.И., Семеновский А.А.* Формование изделий из древесно-клеевой композиции. – Москва: Лесная пром-сть, 1982. – 136 с.
2. *Свиткин М.З., Щедро Д.А.* Технология изготовления изделий из измельченной древесины. – Москва: Лесная пром-сть, 1976. – 140 с.
3. *Кортаев З.И., Симонов В.М.* Производство строительных материалов из древесных отходов. – Москва: Лесная пром-сть, 1972. – 144 с.

4. *Коробов В.В., Рушинов Н.П.* Переработка низкокачественного сырья. – Москва: Экология, 1991. – 287 с.

5. А.с. SU 1186482 А, Устройства для изготовления профильных изделий из стружечно-клеевых масс / А.Р. Бирман, П.В. Бойцов, А.Б. Израелит; заявл. 13.04.1984; опубл. 23.10.1985., Бюл. № 39. – 3 с.

Сведения об авторах

ФИО	Бирман Алексей Романович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	3247-9904
e-mail	birman1947@mail.ru

ФИО	Угрюмов Станислав Сергеевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	3884-9301
e-mail	ugriumov.s@yandex.ru

ФИО	Орлов Виталий Владимирович
Организация	Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного
Адрес организации	194064, К-64, Тихорецкий проспект, д.3, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	7858-2792
e-mail	artictvetal1987@gmail.com

Аннотация

В статье рассмотрен практический вопрос разработки упрощенной конструкции устройства для изготовления профильных изделий из древесно-клеевых масс за счет изменения положения оси вальца относительно направления подачи ковра стружечно-клеевой массы. Представлено описание разработанного технического решения, которое позволяет изготавливать погонажную продукцию типа наличник, плинтус и т.п., а также облицовочные профильные плиты с высокими декоративными показателями.

Ключевые слова: изделия из древесно-клеевых масс, линия, пьезотермообработка, питатель, ленточный транспортер, прессующий барабан.

УДК 674.02

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.43.99

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ СУШИЛЬНОЙ КАМЕРЫ ДРЕВЕСИНЫ НА БАЗЕ ОБОРУДОВАНИЯ ОВЕН И SCADA-СИСТЕМЫ

Болдырев И.В., Елисеев И.В.

Введение.

Процесс сушки древесины является одним из важнейших этапов технологической подготовки пиломатериалов перед их дальнейшим использованием в строительстве, мебельной промышленности и производстве различных деревянных изделий. Основной задачей данного процесса является снижение влажности древесины до нормативных значений при сохранении её физико-механических свойств. При неправильном выборе режима сушки могут возникать внутренние напряжения в структуре древесины, приводящие к образованию трещин, короблению и снижению прочностных характеристик материала [1].

Наиболее распространенным оборудованием для промышленной сушки пиломатериалов являются конвективные сушильные камеры, в которых удаление влаги происходит за счет циркуляции нагретого воздуха через штабеля древесины. Эффективность работы таких установок во многом определяется стабильностью поддержания технологических

параметров, к которым относятся температура воздуха, относительная влажность и скорость его движения. Отклонение этих параметров от заданных значений может привести к увеличению времени сушки, повышенному расходу тепловой энергии и ухудшению качества готовой продукции.

Современные тенденции развития деревообрабатывающей промышленности связаны с внедрением автоматизированных систем управления технологическими процессами. Использование программируемых логических контроллеров и систем диспетчеризации позволяет обеспечить непрерывный контроль параметров сушильной камеры, автоматическую регистрацию данных и оперативное управление режимами работы оборудования. Одним из распространенных решений в области промышленной автоматизации является применение оборудования компании ОВЕН, которое широко используется для построения систем управления различными технологическими установками. Дополнительные возможности анализа и визуализации данных обеспечивает применение SCADA-систем, позволяющих организовать централизованный мониторинг технологических процессов.

Цель работы – разработка системы мониторинга и диспетчеризации сушильной камеры древесины на базе оборудования ОВЕН и SCADA-системы, обеспечивающей контроль основных технологических параметров процесса сушки и повышение эффективности эксплуатации сушильной установки.

Методы исследования.

При выполнении работы использовались методы анализа технологических процессов деревообрабатывающего производства, методы теплотехнических расчетов сушильных камер, а также принципы построения автоматизированных систем управления технологическими установками. В качестве аппаратной платформы системы мониторинга выбран программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК210-04-CS, обеспечивающий сбор данных с измерительных датчиков и передачу информации на верхний уровень управления.

В рабочем объеме сушильной камеры устанавливаются датчики температуры и относительной влажности воздуха. Сигналы с датчиков поступают на входы контроллера, где осуществляется их обработка и преобразование в цифровую форму. Передача информации в систему диспетчеризации осуществляется по промышленному интерфейсу RS-485 с использованием протокола Modbus. Для визуализации параметров технологического процесса применяется SCADA-система, обеспечивающая

отображение текущих значений параметров, архивирование данных и формирование отчетов о работе оборудования.

Результаты исследования.

Для определения основных параметров работы сушильной камеры были выполнены теплотехнические расчеты, позволяющие оценить требуемую тепловую мощность системы нагрева воздуха [2]. Тепловая мощность определяется по следующему выражению:

$$Q = G \cdot c \cdot (t_2 - t_1), \quad (1)$$

где Q – тепловая мощность, Вт;

G – массовый расход воздуха, кг/с;

c – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°C);

t_2 – температура нагретого воздуха;

t_1 – температура воздуха на входе.

При расходе воздуха 2,5 кг/с и нагреве воздуха с 20 °C до 80 °C тепловая мощность сушильной камеры составит

$$Q = 2,5 \cdot 1000 \cdot (80 - 20).$$

$$Q = 150000 \text{ Вт.}$$

Следовательно, для поддержания требуемого температурного режима необходимо обеспечить тепловую мощность нагревательной системы порядка 150 кВт.

Важным параметром процесса сушки является количество влаги, удаляемой из древесины. Масса влаги определяется выражением:

$$W = m(u_1 - u_2), \quad (2)$$

где m – масса древесины, кг;

u_1 – начальная влажность древесины;

u_2 – конечная влажность древесины.

При массе партии пиломатериалов 5000 кг, начальной влажности 60 % и конечной влажности 12 % количество удаляемой влаги составит:

$$W = 5000(0,60 - 0,12).$$

$$W = 2400 \text{ кг.}$$

Таким образом, в процессе сушки необходимо удалить около 2,4 т влаги.

Для обеспечения эффективного удаления влаги требуется организовать интенсивную циркуляцию воздуха внутри сушильной камеры. Расход воздуха можно определить по формуле:

$$L = \frac{W}{d_2 - d_1}, \quad (3)$$

где L – расход воздуха;

d_2 – влагосодержание воздуха на выходе из камеры;

d_1 – влагосодержание воздуха на входе.

При разности влагосодержания воздуха 0,01 кг/кг расчетный расход воздуха составит:

$$L = \frac{2400}{0,01} = 240000 \text{ кг.}$$

Полученные результаты позволяют определить основные требования к системе вентиляции сушильной камеры [3].

Разработанная система мониторинга включает три функциональных уровня. На нижнем уровне располагаются измерительные датчики температуры и влажности, установленные внутри рабочей зоны камеры. На среднем уровне функционирует программируемый логический контроллер ОВЕН, выполняющий сбор и обработку сигналов с датчиков. Верхний уровень представлен SCADA-системой, обеспечивающей визуализацию параметров технологического процесса и управление режимами работы оборудования [4].

В качестве программного обеспечения верхнего уровня в разрабатываемой системе предлагается использовать SCADA-систему OWEN Process Manager, предназначенную для построения систем диспетчеризации технологических процессов на базе оборудования компании ОВЕН. Данная система обеспечивает сбор данных с программируемых логических контроллеров, их обработку, визуализацию и архивирование [7]. Связь между контроллером ОВЕН ПЛК210-04-CS и SCADA-системой осуществляется по промышленному интерфейсу RS-485 с использованием протокола Modbus RTU, что позволяет обеспечить надежный обмен технологической информацией [5].

SCADA-система выполняет функции отображения текущих значений температуры и относительной влажности воздуха в сушильной камере, контроля состояния исполнительных механизмов, а также визуализации работы вентиляционного и нагревательного оборудования. Оператор системы получает возможность наблюдать изменение параметров технологического процесса в режиме реального времени с использованием графических мнемосхем и трендов. Построение графиков изменения температуры и влажности позволяет анализировать динамику процесса сушки и своевременно выявлять отклонения от заданного режима.

Одной из важнейших функций системы диспетчеризации является архивирование технологических данных. Все измеряемые параметры сохраняются в базе данных, что позволяет проводить последующий анализ эффективности режимов сушки, выявлять возможные неисправности

оборудования и оптимизировать технологические параметры работы сушильной камеры. Архивные данные могут использоваться для формирования отчетов о работе установки за заданный период времени.

Дополнительно в системе реализована функция аварийной сигнализации. При превышении допустимых значений температуры или влажности SCADA-система формирует предупреждающее сообщение оператору и регистрирует событие в журнале аварий. Это позволяет повысить надежность эксплуатации сушильной камеры и обеспечить своевременное реагирование на возможные нарушения технологического процесса [6].

Интерфейс оператора представлен мнемосхемой сушильной камеры, на которой отображаются основные элементы технологической установки и текущие значения контролируемых параметров. Использование такого интерфейса облегчает контроль работы оборудования и повышает удобство управления технологическим процессом.

В табл. 1 представлены основные параметры технологического процесса сушки древесины. В табл. 2 представлены основные элементы системы автоматизации.

Табл. 1. Основные параметры технологического процесса сушки древесины

Параметр	Диапазон значений
Температура воздуха	40–120 °С
Относительная влажность воздуха	20–100 %
Скорость циркуляции воздуха	2–5 м/с
Влажность древесины	8–80 %

Табл. 2. Основные элементы системы автоматизации

Оборудование	Назначение
ОВЕН ПЛК210-04-CS	сбор и обработка сигналов
Датчики температуры	контроль температуры воздуха
Датчики влажности	контроль влажности
SCADA-система	визуализация и диспетчеризация

Использование SCADA-системы позволяет формировать архивные базы данных технологических параметров и проводить анализ эффективности режимов сушки. На основе накопленных данных возможно дальнейшее совершенствование алгоритмов управления сушильной камерой и оптимизация технологических режимов.

Заключение.

В результате проведенного исследования разработана система мониторинга и диспетчеризации сушильной камеры древесины на базе оборудования ОВЕН и SCADA-системы. Проведенные теплотехнические расчеты позволили определить основные параметры работы сушильной установки, включая необходимую тепловую мощность системы нагрева воздуха и количество влаги, удаляемой из древесины в процессе сушки.

Разработанная система автоматизации обеспечивает непрерывный контроль технологических параметров сушильной камеры и позволяет повысить эффективность эксплуатации оборудования. Использование программируемого логического контроллера и SCADA-системы обеспечивает возможность архивирования данных, анализа режимов работы и своевременного реагирования на отклонения параметров технологического процесса.

Внедрение подобных систем мониторинга способствует повышению качества высушиваемой древесины, снижению энергозатрат и повышению надежности работы сушильных установок на предприятиях деревообрабатывающей промышленности.

Библиографический список

1. *Уголев Б.Н.* Древесиноведение и физические свойства древесины. – Москва: Лесная промышленность, 2007. – 352 с.
2. *Саликеева С.Н., Галеева Ф.Т., Сафин Р.Р., Филипова Н.А.* Древесина и технологии сушки древесины: учебно-методическое пособие. – Казань: КНИТУ, 2012. – 124 с.
3. *Махова Т.А., Тутыгин А.С., Айзеништадт А.М.* Древесина как строительный материал: учебное пособие. – Архангельск: САФУ имени С.В. Ломоносова, 2017. – 109 с.
4. *Шишелов М.А.* Особенности и проблемы развития лесной промышленности Российской Федерации // Научное обозрение, 2015. – №11. – С. 229–237.
5. *Петров А.В.* Автоматизация технологических процессов деревообработки // Лесотехнический журнал, 2019. – Т. 9. – №4. – С. 85–92.
6. *Иванов В.Г.* SCADA-системы в промышленной автоматизации. – Москва: Энергоатомиздат, 2018. – 240 с.
7. Официальный сайт компании ОВЕН. Программируемые логические контроллеры и средства автоматизации. URL: <https://owen.ru> (дата обращения 30.03.2026).

Сведения об авторах

ФИО	Болдырев Илья Владиславович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	7716-3406
e-mail	Илья_boldyrev_2020@mail.ru
ФИО	Елисеев Игорь Владимирович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	4541-3386
e-mail	yeliseyef@yandex.ru

Аннотация

В статье рассматривается разработка системы мониторинга и диспетчеризации сушильной камеры древесины на базе оборудования ОВЕН и SCADA-системы. Проведен анализ технологического процесса конвективной сушки пиломатериалов и определены основные параметры, подлежащие контролю в процессе работы сушильной установки. Выполнены теплотехнические расчеты, позволяющие определить требуемую тепловую мощность системы нагрева и количество удаляемой влаги из древесины. Предложена структура автоматизированной системы мониторинга, включающая датчики технологических параметров, программируемый логический контроллер и систему диспетчеризации. Показано, что внедрение разработанной системы позволяет повысить эффективность управления сушильной камерой, обеспечить стабильность технологического процесса и улучшить качество высушиваемой древесины.

Ключевые слова: сушка древесины, сушильная камера, автоматизация, ПЛК ОВЕН, SCADA-система, мониторинг технологических процессов, управление сушкой.

УДК 62-529

Разделы рубрикатора ГРНТИ 50.43.19

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ НИЗКОЛИКВИДНОЙ ДРЕВЕСИНЫ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Грязнов Н.А.*

Введение.

Рациональное использование древесных ресурсов является одной из ключевых задач развития лесопромышленного комплекса. Лесная промышленность традиционно занимает важное место в экономике многих стран, обладающих значительными лесными ресурсами. Однако в процессе лесозаготовительных работ образуется значительное количество древесины, не соответствующей требованиям традиционных технологий переработки [1].

К низколиквидной древесине относят древесину малого диаметра, древесину с различными дефектами, а также древесные остатки,

образующиеся при лесозаготовках и первичной переработке древесины. В большинстве случаев подобное сырье используется недостаточно эффективно либо вовсе не вовлекается в хозяйственный оборот [2].

По оценкам специалистов, доля низколиквидной древесины в структуре заготавливаемого древесного сырья может достигать 30–40 %. При этом значительная часть древесных отходов остается на лесосеке или используется нерационально [3].

Одним из перспективных направлений повышения эффективности использования древесных ресурсов является внедрение технологий комплексной переработки древесного сырья. Такие технологии позволяют перерабатывать не только деловую древесину, но и низкосортное древесное сырье, а также различные виды древесных отходов, в том числе вторично использовать древесные отходы при получении композиционных материалов конструкционного назначения на основе технологий фанерного и плитного производства [4,5].

Особое значение в данном направлении имеют малотоннажные технологические комплексы переработки древесины, позволяющие организовать переработку древесного сырья непосредственно в районах лесозаготовок. Применение подобных технологических решений позволяет значительно повысить уровень использования древесных ресурсов и снизить транспортные затраты.

Целью исследования является анализ технологических решений, направленных на повышение эффективности переработки низколиквидной древесины на предприятиях лесопромышленного комплекса.

Материалы и методы исследования.

Методологической основой исследования являлись методы системного анализа технологических процессов переработки древесного сырья, а также методы сравнительного анализа технологических схем переработки древесины.

На первом этапе исследования был проведен анализ научно-технической литературы, посвященной вопросам комплексного использования древесного сырья и переработки древесных отходов. Были изучены современные направления развития технологий переработки древесины, включая производство технологической щепы, древесных топливных гранул, брикетов и древесного угля.

На втором этапе исследования был выполнен анализ технологических схем переработки древесного сырья, применяемых на предприятиях лесопромышленного комплекса. Рассматривались как традиционные технологические схемы переработки древесины, так и современные

технологии, предусматривающие комплексное использование древесных ресурсов.

Особое внимание уделялось технологическим решениям, позволяющим перерабатывать низколиквидную древесину непосредственно в районах ее заготовки.

Результаты исследования.

Для оценки эффективности использования древесного сырья был применен коэффициент использования древесных ресурсов, который определяется следующим выражением:

$$K = V_{\text{п}} / V_{\text{с}}, \quad (1)$$

где K – коэффициент использования древесного сырья;

$V_{\text{п}}$ – объем продукции, полученной из древесного сырья;

$V_{\text{с}}$ – объем исходного древесного сырья.

Данный показатель позволяет определить степень использования древесных ресурсов при различных технологических схемах переработки.

Результаты проведенного анализа показали, что традиционные технологические схемы переработки древесины характеризуются относительно низким уровнем использования древесного сырья.

В условиях традиционной организации производства значительная часть низколиквидной древесины не вовлекается в технологический процесс переработки. В результате этого образуется значительный объем древесных отходов.

Внедрение технологий комплексной переработки древесного сырья позволяет значительно повысить уровень использования древесных ресурсов. В частности, использование малотоннажных технологических комплексов переработки древесины дает возможность организовать переработку низколиквидной древесины непосредственно в районах лесозаготовок.

При применении комплексных технологических схем переработки древесного сырья коэффициент использования древесных ресурсов может достигать 80–85 %, что значительно превышает показатели традиционных технологий.

Получаемая продукция может включать технологическую щепу, древесные топливные гранулы, древесные брикеты и древесный уголь. Основные направления переработки низколиквидной древесины представлены в табл. 1.

Табл. 1. Основные направления переработки низколиквидной древесины

<i>Вид древесного сырья</i>	<i>Направление переработки</i>
Тонкомерная древесина	Производство технологической щепы
Древесные отходы	Производство топливных пеллет
Низкосортная древесина	Производство древесного угля
Отходы деревообработки	Производство топливной продукции

Полученные результаты подтверждают целесообразность внедрения гибких технологических схем переработки древесного сырья. Использование малотоннажных производственных комплексов позволяет значительно повысить эффективность использования древесных ресурсов.

Кроме того, применение комплексных технологических решений позволяет снизить объем древесных отходов и повысить экономическую эффективность предприятий лесопромышленного комплекса.

Гибкие технологические линии позволяют изменять структуру выпускаемой продукции в зависимости от характеристик древесного сырья и потребностей рынка. Это обеспечивает возможность более эффективного использования древесных ресурсов и повышения устойчивости лесопромышленных предприятий.

Выводы.

Проблема эффективной переработки низколиквидной древесины является одной из ключевых задач развития лесопромышленного комплекса.

Проведенное исследование показало, что повышение эффективности использования древесных ресурсов возможно за счет внедрения технологий комплексной переработки древесного сырья и использования малотоннажных технологических комплексов.

Применение гибких технологических решений позволяет увеличить коэффициент использования древесного сырья, снизить объем древесных отходов и повысить экономическую эффективность предприятий лесопромышленного комплекса.

Библиографический список

1. *Никишов В.Д.* Комплексное использование древесины: учебник для вузов. – Москва: МГУЛ, 2006. – 262 с.

2. Рублева Е.С., Рублева О.А., Тарбеева Н.А., Ведерников Я.Д. Анализ актуальных методов переработки низколиквидной древесины // Общество. Наука. Инновации (НПК-2024) : сборник материалов XXIV Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. – Киров: ВятГУ, 2024. – С. 136-141.

3. Крылов В.Н., Борозна А.А., Суконкин С.Е., Грязнов Н.А. Инновационные малотоннажные технологии переработки низколиквидной древесины // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 88-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов. – Минск: БГУ, 2024. – С. 3-5.

4. Свешников А.С., Угрюмов С.А. Модернизация линии по производству фанеры с внутренним слоем на основе древесных отходов // Ремонт. Восстановление. Модернизация, 2014. – № 6. – С. 13-15.

5. Угрюмов С.А., Кожевников Д.А. Плитные композиционные материалы на основе совмещенных наполнителей // Все материалы. Энциклопедический справочник, 2011. – № 11. – С. 15-17.

Сведения об авторах

ФИО	Грязнов Никита Андреевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	nag160400@gmail.com

*Работа выполнена под руководством д.т.н., проф. Угрюмова С.А.

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы повышения эффективности использования низколиквидной древесины на предприятиях лесопромышленного комплекса. Проведен анализ существующих направлений переработки древесины низкого качества и древесных отходов. Рассмотрены технологические решения, направленные на повышение уровня комплексного использования древесного сырья,

включая применение малотоннажных производственных комплексов и гибких технологических схем переработки. Показано, что внедрение комплексных технологий переработки позволяет увеличить степень использования древесных ресурсов, снизить объем древесных отходов и повысить экономическую эффективность предприятий лесопромышленного комплекса.

Ключевые слова: низколиквидная древесина, лесопромышленный комплекс, переработка древесины, древесные отходы, комплексное использование древесного сырья, малотоннажные технологии.

УДК 630.861

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.29.99

РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСНЫХ ВОЛОКОН И ПОЛИМЕРНЫХ СВЯЗУЮЩИХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ И ОТДЕЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Коченгина О.Е., Куттуева М.А., Парфенопуло Г.К.

Введение.

Строительная индустрия находится в постоянном поиске материалов, способных сочетать эстетику натурального дерева с технологичностью и долговечностью синтетических полимеров. Древесно-полимерные композиты (ДПК) представляют собой класс гетерофазных систем, в которых дисперсная фаза (древесные волокна или мука) распределена в объеме полимерной матрицы. Интерес к таким материалам обусловлен не только возможностью утилизации отходов деревообработки, но и способностью целенаправленно регулировать свойства конечного продукта, варьируя состав, соотношение компонентов и технологические параметры. Актуальность теоретических исследований в этой области продиктована необходимостью систематизации знаний о механизмах взаимодействия компонентов, прогнозирования свойств и разработки научно обоснованных подходов к созданию материалов с заданными эксплуатационными характеристиками.

Цель работы – анализ роли компонентов композита и характера их взаимодействия. Рассмотрение механизмов армирования и влияния межфазной границы. Классификация модифицирующих добавок и их

теоретическое влияние на свойства. Обоснование зависимости «состав – структура – свойство» для ДПК.

Методы исследования.

В работе использованы методы системного анализа научно-технической литературы, сравнительного анализа существующих подходов к созданию полимерных композитов, а также теоретическое обобщение данных о физико-химических процессах, протекающих на границе раздела фаз в гетерогенных системах.

Результаты исследования.

В рамках анализа создания древесно-полимерных композитов ключевым вопросом выступает понимание природы используемых компонентов и закономерностей их совместного поведения в гетерогенной системе. Древесный наполнитель, представляющий собой лигноцеллюлозный комплекс, выполняет в композите несколько функций [1]. Прежде всего, это армирующий элемент: волокна целлюлозы, обладающие высокой жесткостью и прочностью на разрыв, способны воспринимать механические нагрузки, передаваемые от полимерной матрицы. Однако, в отличие от синтетических волокон (стеклянных или углеродных), древесные частицы имеют сложную морфологию и химическую природу, что существенно усложняет прогнозирование свойств. Увеличение доли наполнителя должно повышать модуль упругости материала, однако на практике эта зависимость ограничивается пределом насыщения, за которым полимер перестает выполнять функцию сплошной среды, смачивающей и связывающей частицы.

Критическим аспектом теории композитов является проблема совместимости компонентов. Полимерная матрица, особенно в случае наиболее распространенных термопластов (полиэтилен, полипропилен), имеет гидрофобную неполярную природу. Древесное волокно, напротив, гидрофильно и полярно благодаря наличию гидроксильных групп в целлюлозе и гемицеллюлозе [2]. С термодинамической точки зрения, такая система стремится к минимизации поверхности контакта, что выражается в плохой адгезии на границе раздела фаз. Именно это объясняет необходимость введения в композицию специальных добавок – компатибилизаторов, или агентов совместимости. Роль компатибилизатора заключается в снижении межфазного натяжения: его молекула имеет биполярное строение, где одна часть способна взаимодействовать с полимером (например, за счет физических зацеплений или со кристаллизации), а другая – с гидроксильными группами древесины (за счет образования водородных или химических связей). В результате

формируется переходный слой, обеспечивающий передачу напряжений от матрицы к волокну без разрушения границы.

Рассматривая полимерную матрицу, следует выделить два принципиально различных класса связующих – термопласты и термореактивные смолы. Различие между ними обусловлено строением макромолекул и характером их взаимодействия, что предопределяет поведение материала при нагревании и, в конечном счете, весь комплекс свойств композита.

Термопласты представляют собой полимеры с линейным или слаборазветвленным строением цепей. Макромолекулы связаны между собой физическими межмолекулярными силами, которые при нагревании ослабевают. Это позволяет материалу обратимо переходить в вязкотекучее состояние, затвердевая при охлаждении без изменения химической структуры. Типичные представители – полиолефины (полиэтилен, полипропилен) и поливинилхлорид. Термопласты обеспечивают композиту высокую ударную вязкость благодаря подвижности цепей, поглощающих энергию удара. Обратимость плавления открывает возможность вторичной переработки и использования высокопроизводительных методов формования, таких как непрерывная экструзия [3]. Однако теоретически, термопласты обладают низкой поверхностной энергией и, за исключением ПВХ, преимущественно неполярны. Это приводит к термодинамической несовместимости с полярной гидрофильной поверхностью древесных волокон, следствием чего является плохая адгезия, требующая введения специальных добавок-компабилизаторов. Кроме того, терmostойкость термопластов ограничена, а под длительной нагрузкой они проявляют ползучесть.

Термореактивные смолы (феноло-формальдегидные, карбамидные) в исходном состоянии представляют собой низкомолекулярные олигомеры. В процессе отверждения они образуют трехмерную пространственную сетку с поперечными химическими связями. Эта реакция необратима: после формирования сетки материал теряет способность плавиться и растворяться. Сетчатая структура обеспечивает высокую жесткость, терmostойкость и отсутствие ползучести, так как химические связи препятствуют смещению цепей относительно друг друга. Полярная природа этих смол способствует лучшей адгезии к древесному наполнителю. Однако платой за эти свойства является хрупкость материала и невозможность повторной переработки, а технология формования ограничена методами горячего прессования.

Также много внимания уделяется механизмам разрушения композитов. В древесно-полимерных системах реализуется несколько сценариев: котезионный разрыв (по матрице), адгезионный отрыв (по границе волокно-матрица) и разрушение самого волокна. Доминирование того или иного механизма напрямую зависит от качества межфазной адгезии. При слабой связи трещина распространяется вдоль границы, огибая волокна, что приводит к невысокой энергии разрушения. При сильной адгезии волокно вовлекается в работу, и для его разрыва требуется затратить дополнительную энергию, что повышает ударную вязкость и прочность композита.

Важным аспектом является также прогнозирование долговечности ДПК. Древесный наполнитель, будучи капиллярно-пористым телом, способен сорбировать влагу из окружающей среды. Процесс водопоглощения в композите описывается законами диффузии Фика, однако наличие межфазных границ и дефектов структуры создает каналы для ускоренного проникновения воды. Теоретически, влага, проникая вглубь материала, вызывает набухание древесных частиц, что создает внутренние напряжения и может приводить к микродефектам [4]. Кроме того, вода способствует гидролизу связей на границе раздела, постепенно ухудшая адгезию. Поэтому в теоретических моделях прогнозирования срока службы ДПК обязательно учитывается диффузионная проницаемость матрицы и доля непроклеенных участков.

Рассматривая перспективы улучшения свойств, обосновано применение наноразмерных модификаторов. Введение в матрицу небольших количеств (до 1-2%) наночастиц (оксидов металлов, силикатов или углеродных нанотрубок) способно создавать дополнительные центры структурирования полимера, изменять его надмолекулярную организацию и повышать барьерные свойства по отношению к газам и парам воды. Это открывает путь к созданию композитов с улучшенными эксплуатационными характеристиками без увеличения степени наполнения древесиной.

Наконец, осмысление процесса переработки ДПК указывает на сложность реологических свойств расплавов. Высоконаполненные системы проявляют аномалию вязкости (псевдопластичность), а наличие древесных частиц может приводить к турбулизации потока и возникновению дефектов поверхности. Понимание этих закономерностей позволяет теоретически обосновать выбор геометрии экструзионного оборудования и температурных профилей для получения качественных изделий без дефектов.

Заключение.

Проведенный анализ позволяет утверждать, что свойства древесно-полимерных композитов определяются сложным комплексом факторов, центральное место среди которых занимает характер взаимодействия на границе раздела фаз. Отсутствие термодинамической совместимости между гидрофильным наполнителем и гидрофобной матрицей является ключевой проблемой, решаемой путем введения компатибилизаторов. Обоснована необходимость оптимизации степени наполнения для достижения баланса между жесткостью и прочностью. Прогнозирование долговечности ДПК базируется на учете диффузионных процессов и механизмов накопления повреждений. Дальнейшее развитие представлений в этой области должно быть направлено на создание математических моделей, связывающих параметры сырья, технологические режимы и конечные свойства материала, что позволит перейти от эмпирического подбора составов к целенаправленному конструированию композитов с заданными характеристиками.

Библиографический список

1. Авдоница А.Е., Коченгина О.Е., Куттеева М.А. Контроль качества древесины // СНК-2025: материалы LXXV международной студенческой научной конференции Московского Политеха. – Москва: МПУ, 2025. – С. 1100-1107.
2. Композиты с полимерной матрицей. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%B7%D0%B8%D1%82%D1%8B_%D1%81_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B9_%D0%BC%D0%B0%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%86%D0%B5%D0%B9 (дата обращения 09.03.2026).
3. Термопласты. URL: <https://proplast.ru/articles/termoplastyi/> (дата обращения 12.03.2026)
4. Закон диффузии Фика. URL: https://elcut.ru/advanced/ficks_law_r.htm (дата обращения 12.03.2026).

Сведения об авторах

ФИО	Коченгина Оксана Евгеньевна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	oksana.kuz5@mail.ru

ФИО	Куттуева Мария Александровна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	mkuttueva@yandex.ru

ФИО	Парфенопуло Георгий Константинович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	1848-9386
e-mail	mmu49@mail.ru

Аннотация

В статье рассматриваются основы создания композиционных материалов из древесных волокон и полимерных связующих для строительной отрасли. Анализируются проблемы совместимости компонентов, механизмы межфазного взаимодействия и факторы, определяющие структуру и свойства композитов. Особое внимание уделяется роли компатибилизаторов, влиянию степени наполнения и типа полимерной матрицы на эксплуатационные характеристики материалов.

Ключевые слова: древесно-полимерные композиты, древесные волокна, полимерная матрица, межфазная адгезия, компатибилизаторы, строительные материалы.

УДК 691-419:674.812

Разделы рубрикатора ГРНТИ 67.15.39

ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫПУСКА БРИКЕТОВ ИЗ КОРЫ В УСЛОВИЯХ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Угрюмов С.А., Макаров И.В.

Введение.

Целлюлозно-бумажная промышленность является одной из ключевых отраслей лесопромышленного комплекса России. В условиях растущего внимания к вопросам экологии и рационального использования природных ресурсов особое значение приобретает внедрение средоохраняющей технологии лесозаготовки и переработки древесного сырья с максимальной переработкой образующихся древесных отходов [1,2]. Современные предприятия стремятся к внедрению технологических решений, позволяющих наиболее полно использовать все компоненты древесного сырья. Это требует совершенствования существующих процессов, повышения их энергетической и экономической эффективности, а также адаптации к требованиям законодательства, в том числе лесного законодательства.

В условиях растущего внимания к вопросам экологии и рационального использования природных ресурсов особое значение приобретает переработка древесных отходов, в частности древесной коры [3]. Эффективное использования древесной коры позволяет значительно сократить объемы производственных отходов, снизить нагрузку на окружающую среду и получить дополнительную продукцию.

Большое количество древесной коры образуется на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности, в том числе на ООО «Сегежский целлюлозно-бумажный комбинат» (Сегежский ЦБК).

Целью работы является разработка и обоснование технологических решений по повышению эффективности переработки древесной коры на базе ООО «Сегежский целлюлозно-бумажный комбинат», а также анализ

производственно-экологических и экономических аспектов существующей системы обращения с отходами.

Основным критерием при выборе технологии переработки коры для Сегежского ЦБК является адаптация к специфике сырья – коре хвойных пород (ель, сосна), которая отличается повышенным содержанием смол (8–15%) и высокой влажностью (70–85%).

Результаты исследований.

Возможные направления переработки коры – сжигание в топках котельных для получения теплоэнергии, компостирование, пиролиз, брикетирование.

Выбор брикетирования в качестве приоритетного метода для обусловлен не только его преимуществами, но и ограничениями других методов в текущих условиях предприятия:

1. Сжигание. Модернизация существующих котлов для эффективного сжигания коры потребовала бы капитальных затрат порядка 12 млн. руб., не решив при этом проблему низкой рентабельности из-за высокой влажности сырья и необходимости его предварительной подготовки (измельчение). Основной объем коры (80%) не может быть эффективно утилизирован этим методом без глубокой переработки.

2. Компостирование. Этот метод пригоден только для коры с низким содержанием смол (<5%), которая составляет менее 20% от общего объема на предприятии (основные породы – смолистые сосна и ель). Высокое содержание таннинов и смол замедляет процесс и требует промывки, увеличивая затраты воды и энергии. Необходимость больших площадей (1 га на 500 т) делает метод неприемлемым при дефиците территории в промзоне комбината.

3. Пиролиз. Глубокая переработка с получением биоугля и синтез-газа требует капитальных вложений свыше 40 млн. руб. и сложной инфраструктуры. Отсутствие на площадке квалифицированного персонала для обслуживания высокотехнологичных пиролизных установок и неразвитость рынка сбыта биоугля в регионе делают этот метод экономически рискованным на текущем этапе.

4. Производство королита. Организация данного производства требует значительных инвестиций (более 30 млн. руб. на одну линию), сложной сертификации (ГОСТ 32289–2013) и создания новых каналов сбыта строительных материалов. Этот метод переработки коры является перспективным, но вторичным направлением после налаживания сбыта брикетов и накопления опыта.

5. Брикетирование. Является рациональным вариантом переработки коры, так как позволяет использовать сырье с высокой влажностью после предварительной сушки. Смолы в коре хвойных пород выступают как природный связующий компонент, повышая прочность брикетов. Технология интегрируется в существующую инфраструктуру без кардинальной перестройки производства.

Исследования [4] подтверждают, что брикетирование коры хвойных деревьев увеличивает плотность топлива на 30% по сравнению с лиственными породами, что делает метод особенно перспективным для Карелии и Сегежского ЦБК.

Процесс переработки коры в топливные брикеты включает семь ключевых этапов, каждый из которых может быть адаптирован под производственные условия Сегежского ЦБК.

1. Первичная приемка и сортировка. Кора поступает из окорочного цеха по ленточному транспортеру. На этом этапе происходит грубая очистка от крупных примесей (камни, ветки) с помощью барабанного грохота. Важность сортировки подчеркивается в исследовании ВНИИБТ

2. Дробление. Для измельчения коры до фракции 3...5 мм используется двухроторный шредер WEIMA WLK-15 с системой ножей из карбида вольфрама. Выбор этой модели обусловлен её способностью работать с влажным сырьем без заклинивания.

3. Сушка в барабанной установке. Снижение влажности с 75% до 12% происходит в сушильном барабане БС-1,5 с рекуперацией тепла. Тепловая энергия поступает от дымовых газов котельной комбината, что сокращает расходы на сушку на 25%. Температурный режим (120...140°C) и скорость вращения барабана (5 об/мин) подобраны экспериментально для минимизации деградации лигнина – природного связующего в коре.

4. Дозирование и смешивание. Для стабилизации состава сырья в сухую кору добавляют 2% крахмала в качестве дополнительного связующего. Это решение основано на опыте Архангельского ЦБК, где подобная добавка повысила прочность брикетов на 20%.

5. Прессование. Формовка брикетов осуществляется на гидравлическом прессе RUF-600 с давлением 300 бар. Уникальность технологии состоит в использовании конических матриц, которые обеспечивают равномерное уплотнение массы без образования трещин. Для сравнения, шнековые прессы, применяемые в Европе, не справляются с корой высокой смолистости из-за залипания.

6. Термообработка. Брикететы проходят кратковременный (3...5 минут) нагрев до 90°C в туннельной печи. Это позволяет зафиксировать форму и снизить гигроскопичность.

7. Охлаждение и упаковка. Готовые брикететы охлаждаются в течение 20 мин. в вентилируемом накопителе, после чего упаковываются в термоусадочную пленку с добавлением антипиренов. Упаковка предотвращает поглощение влаги при хранении на открытых площадках.

Внедрение линии брикетирования потребует модернизации трех участков комбината:

1. Сырьевой склад. Установка навесов для защиты коры от осадков (снижение начальной влажности на 10%). Монтаж системы аэрации пола для предотвращения самовозгорания.

2. Энергетический цех. Прокладка дополнительных трубопроводов для подачи дымовых газов к сушильному барабану. Установка частотных преобразователей на вентиляторы для регулировки скорости сушки.

3. Участок готовой продукции. Организация крытого склада площадью 500 м² с поддержанием влажности 40...50%.

Характеристика применяемого оборудования:

- Шредер WEIMA WLK-15 (дробление):

Производительность – 2 т/час, энергопотребление – 25 кВт, срок службы – 7 лет. Ножи требуют замены каждые 600 часов. Выбран из-за способности работать с влажным сырьем.

- Сушильный барабан БС-1,5:

Производительность – 1,5 т/час, энергопотребление – 40 кВт, срок службы – 10 лет. Подшипники заменяются раз в год. Адаптирован для рекуперации тепла.

- Пресс RUF-600:

Производительность – 1,8 т/час, энергопотребление – 30 кВт, срок службы – 8 лет. Матрицы заменяются каждые 2 года. Обеспечивает давление 300 бар, необходимое для смолистой коры.

Обоснование выбора моделей. Шредер WEIMA WLK-15 выбран из-за возможности работы с влажным сырьем, что критично для Сегежского ЦБК, где кора поступает с влажностью 70...85%. Сушильный барабан БС-1,5 адаптирован под рекуперацию тепла, что снижает зависимость от внешних энергоресурсов. Пресс RUF-600 обеспечивает давление 300 бар, необходимое для формирования брикететов из смолистой коры.

Экономическая модель проекта (первая очередь):

Капитальные затраты (первый год):

Оборудование (линия 2,5 т/ч брикететов): 30,0 млн руб.

Модернизация инфраструктуры: 12,0 млн руб.

Пуско-наладочные работы: 3,5 млн. руб.

Итого: 45,5 млн руб.

Данные затраты рассчитаны для переработки всего объема коры, образующегося на предприятии (21 тыс. т.), из которых можно получить → 15,1 тыс. т. брикетов.

Эксплуатационные расходы (ежегодно):

Электроэнергия: около 5,8 млн. руб.

$(100 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т} \times 15,1 \cdot 10^3 \text{ т} \times 4 \text{ руб./кВт} \cdot \text{ч} \times 1,2 \text{ коэффициент нагрузки})$

Тепловая энергия (дополнительная): около 2,5 млн. руб.

Зарплата персонала: около 7,0 млн руб. (8 операторов $\times$ 73 тыс. руб./мес.)

Ремонт и обслуживание: около 4,5 млн. руб.

Амортизация (10% от капитальных затрат): 4,55 млн. руб.

Накладные расходы: около 3,0 млн руб.

Итого: 27,35 млн. руб.

Доходы и экономия (ежегодно):

1. Продажа брикетов (70% производства):

$15,1 \cdot 10^3 \text{ т} \times 0,7 \times 12 \text{ 000 руб./т} = 127,0 \text{ млн. руб.}$

2. Экономия на утилизации коры:

$21 \cdot 10^3 \text{ т} \times 1 \text{ 500 руб./т} = 31,5 \text{ млн. руб.}$

3. Экономия на закупке угля (30% брикетов):

Эквивалент угля: $(4 \text{ 536 т брикетов} \times 16 \text{ МДж/кг}) / 22 \text{ МДж/кг} = 3 \text{ 300 т угля.}$

$3 \text{ 300 т} \times 5 \text{ 000 руб./т} = 16,5 \text{ млн руб.}$

4. Итого доход/экономия: 175,0 млн. руб.

Финансовый результат.

Прибыль до налогообложения: $175,0 - 27,35 = 147,65 \text{ млн. руб.}$

Налог на прибыль (20%): $147,65 \times 0,2 = 29,53 \text{ млн. руб.}$

Чистая прибыль: $147,65 - 29,53 = 118,12 \text{ млн. руб./год}$

Оценка эффективности.

Денежный поток (CF): Чистая прибыль + Амортизация = $118,12 + 4,55 = 122,67 \text{ млн руб./год}$

Срок окупаемости (PP): Кап. затраты / CF = $45,5 / 122,67 \approx 0,37 \text{ года}$ (~4,5 месяцев)

Рентабельность продаж: $118,12 / 175,0 \times 100\% = 67,5\%$

Столь короткий расчетный срок окупаемости требует консервативной интерпретации. Реалистичный срок с учетом рисков (колебания цен, простои оборудования, инфляция) составляет 1...1,5 года.

5. Экологические и социальные аспекты.

Сокращение выбросов, поскольку замена 30% угля брикетами снизит выбросы CO₂ на 1 200 т/год (расчет по методике IPCC 2019). Улавливание летучей золы на 95% за счет электрофильтров.

Использование вторичных ресурсов – зола от сжигания брикетов (3...5% от массы) будет применяться для раскисления почв в местных сельхозугодьях.

Социальный эффект – создание 4 новых рабочих мест с зарплатой выше среднего по региону (75 тыс. руб./мес).

Заключение.

Разработанная технология брикетирования не только решает проблему утилизации коры на Сегежском ЦБК, но и создает новую статью дохода. Ее успех основан на анализе сырьевой базы, использовании рекуперации тепла и адаптации оборудования под смолистые породы. Реализация проекта потребует 24,5 млн руб. инвестиций, но окупится максимум за 1,5 года, что делает его одним из перспективных направлений модернизации предприятия.

Библиографический список

1. Жукова А.И., Григорьева О.И., Иванов А.В. Средоошадающие технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации: монография. – Санкт-Петербург: СПбГЛТА, 2008. – 175 с.

2. Абрамов В.В., Полукаров Д.А. Средоошадающие технологии производства сортиментов и хлыстов на лесосеке // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы международной научно-практической конференции. – Воронеж: ВГЛУ, 2022. – С. 168-176.

3. Федосенко И.Г. Комплексное использование древесины: учебное пособие. – Минск БГТУ, 2020. – 289 с.

4. Михеевская М.А., Друзьянова В.П., Бурмистрова Д.Д., Швецова В.В., Марков О.Б., Ильюшенко Д.А. Энергоемкость прессования древесного сырья при производстве биотоплива // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2022. – №241. – С. 207–217.

Сведения об авторах

ФИО	Угрюмов Сергей Алексеевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	6246-6269
e-mail	ugr-s@yandex.ru
ФИО	Макаров Иван Валерьевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	battercallsaul1@gmail.com

Аннотация

В статье рассмотрена технологическая возможность переработки древесной коры, образующейся в результате переработки древесины на целлюлозно-бумажном комбинате. Изучены технологические особенности переработки древесной коры. Предложена комплексная технология переработки древесной коры с сушкой и последующем брикетированием. Оценена экономическая целесообразность введения новой линии переработки.

Эффективность предложенной технологии определяется высокой степенью утилизации отходов, снижением нагрузки на окружающую среду и улучшение экономических показателей предприятия.

Ключевые слова: целлюлозно-бумажный комбинат, отходы, кора, пеллеты, брикетирование.

УДК 674.8:662.818.6

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.45.47

ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ ДЛЯ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

**Федяев Ал.А., Гончарова Н.А., Федяев П.А., Григорьева Т.А.,
Трифонов Н.И.**

Введение.

В нашей стране лесные ресурсы располагаются на огромных территориях (свыше 90%) [1] и в целом запасы древесины составляют многие десятки млрд. м³. Переработкой древесины занимаются сотни крупных, средних, а также тысячи мелких предприятий. Общей тенденцией в развитии предприятий деревообрабатывающей промышленности является высокий технологический износ рабочего оборудования, достигающий в отдельных организациях критических значений и даже выше (более 80%). Поэтому актуальным является не только обновление парка основного оборудования производственных цехов, что связано с огромными затратами материальных ресурсов, но и модернизация давно устаревшего, но работающего оборудования, в первую очередь крупногабаритного. Так как сушка древесины является наиболее затратной частью в процессе переработки древесины, то заниматься совершенствованием оборудования необходимо в первую очередь в структурных подразделениях, отвечающих за качество готовой продукции.

Одним из самых энергоемких процессов производства является сушка пиломатериалов, поэтому совершенствование технологии данного процесса является перспективным направлением снижения энергоемкости предприятий деревообрабатывающей промышленности.

Цель работы – исследования рабочих характеристик рабочей камеры для сушки пиломатериалов.

Результаты исследования.

Первоочередное внимание следует уделять лесосушильным цехам, как наиболее ответственным за качество выпускаемой продукции. Так в сушильных машинах конвективного типа с движением горячего воздуха вдоль термообрабатываемого материала отмечается [2,3] неравномерность конечного влагосодержания по высоте штабелей сушеного материала. Априори отмечается рост эксплуатационных затрат вследствие неизбежного при этом повышенного технологического брака термообрабатываемого материала.

Сушильные камеры (СК) ЦНИИМОД-49 для пиломатериалов достаточно широко распространены в качестве наиболее крупногабаритных

установок, особенно в сибирских регионах, поэтому они были выбраны как объект рассмотрения влияния различных рабочих характеристик на качество кондиционной продукции [4].

Опытные данные для рассмотрения реальной картины распределения потоков энергоносителя получены в зоне сушки высокопроизводительной конвективной СК производства фирмы «Уралдрев-ИНТО» [3], схема движения газообразного энергоносителя которого отмечена на рис. 1 [5].

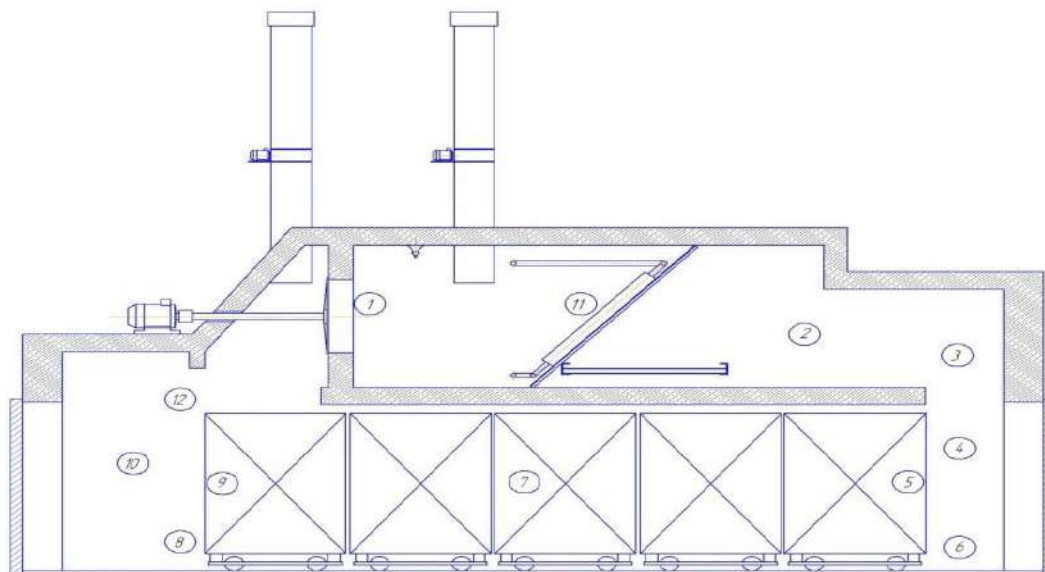


Рис. 1. Порядок движения газообразного энергоносителя в камере сушки

По ходу движения потоков агента сушки приняты следующие обозначения: 1 - вентилятор; 2 - верхний циркуляционный канал; 3, 6, 8, 12 - повороты под углом 90° ; 4, 10 - боковые каналы; 5 - вход в штабель; 7 - штабель; 9 - выход из штабеля; 11 - калорифер.

Так как исследование аэродинамической обстановки СК в реальных условиях является практически нереализуемым, то был выполнен экспериментальный макет рабочей зоны установки в масштабе уменьшения 1:25. В рабочих зонах 2, 3, 4, 5, 6 (см. рис. 1) камеры размещены позиции определения аэродинамических параметров агента сушки по высоте (по соответствующим сечениям). Вектор скорости энергоносителя определялся флажком, а значение скорости потока фиксировалось [6] с помощью насадка полного давления в комплекте с микроманометром.

Пересчет данных экспериментальных исследований в реальные значения скорости потока и в дальнейшем построение профилей потока в соответствующих сечениях рабочей зоны выполнялось с помощью программного продукта. На рис. 2 показан эпизод распределения профилей

скорости по высоте и различным сечениям (а, б, в, г) рабочей зоны по ходу движения потока. В специальных окнах программы представлены примеры расчета аэродинамических характеристик потока в соответствующем сечении. Также расчетный продукт выполняет вывод всех заданных начальных параметров (атмосферное давление, температуру в начале и конце эксперимента, фиксированное полное давление газообразной среды и т.д.). Осуществляется сохранение экспериментальных и расчетных данных и их вывод на бумажный носитель.

Расчетные профили потока были изучены, в частности отмечено, что в узле подачи газообразного потока (зона 4 КС) существует перегиб профиля скорости в верхней части камеры, т.е. зафиксирована зона обратного потока (так называемая застойная зона, на рисунке не показана), существенно увеличивающая сопротивление потоку агента сушки и меняющая другие рабочие параметры, о чем отмечено ниже.

Подвод энергии к сушимой продукции прямопропорционально связан с динамическими параметрами потока, а значит, в верхних слоях штабелей итоговое влагосодержание материала будет значительно выше заданного, что однозначно приводит к технологической некондиции при термообработке пиломатериала.

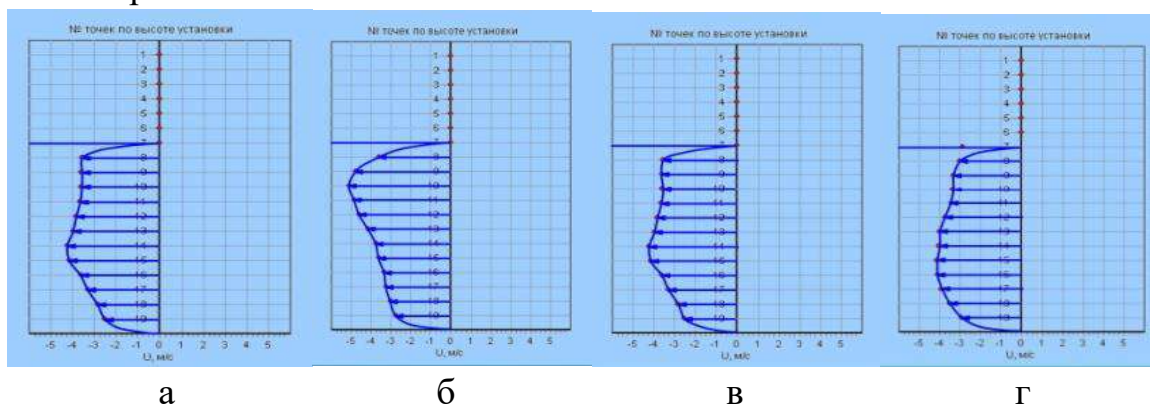


Рис. 2. Экспериментальные типы профилей газообразного потока по сечениям рабочей зоны камеры

Полученные данные экспериментов предопределяют направление дальнейших обширных исследований по выявлению вариантов минимальных затрат по выравниванию профилей потока энергоносителя по высоте СК, а значит и штабеля сушеного материала. Так, например, выполнена первая серия экспериментальных исследований по подбору формы, конфигурации, числа и мест расположения устройств выравнивания потока газообразного энергоносителя. Данные полученных результатов исследований весьма объемные [7,8], будут представлены в последующих публикациях.

Заключение.

По результатам проведенных исследований следует однозначный вывод, что максимально возможное выравнивание подачи потока агента сушки позволяет улучшить целый ряд рабочих показателей работы конвективной сушильной установки (являются наиболее распространенными в сравнении с другими типами СК – практически 95%), наиболее показательными из которых являются: качество кондиционной продукции и снижение времени сушки пиломатериалов. Последнее существенно повлияет на эксплуатационные и экономические показатели работы лесопромышленного предприятия.

Как показали дальнейшие исследования, их анализ и выполненные расчетные исследования, эффективность установки направляющих узлов по газовому тракту рабочей камеры непосредственно влияет на величину снижения технологического брака пиломатериалов – в пределах до 5%. Для лесосушильного цеха, состоящего из пяти камер, экономия составляет более 1700 м³/год готовой продукции. Также равномерный энергоподвод снижает продолжительность работы СК в течение одного периода сушки до 35% и более за счет вынужденной «досушки» материала до кондиционных параметров, а соответственно и затраты на потребление тепловой и электрической энергии.

Результаты исследований могут быть использованы в лесосушильном производстве.

Библиографический список

1. Данилов О.Л., Леончик Б.И. Экономия энергии при тепловой сушке. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.
2. Федяев А.А. Энергосбережение при сушке пиломатериалов за счет кинетической оптимизации // Вестник «КрасГАУ», 2008. – №1(22). – С. 228-232.
3. Федяев А.А., Федяева В.Н. Оценка эффективности использования энергоносителя в технологической системе предприятия // Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: материалы XIV (XXXVI) Всероссийской научно-технической конференции. – Братск: Изд-во БрГУ, 2015. – 1 с.
4. Федяев Ал.А. Энергоэффективность сушки при изменении внешних факторов в ленточных установках // Наука и технологии в лесопромышленном комплексе: сборник научных трудов международной научно-практической конференции. – Брянск: БГИТУ, 2023. – С. 103-105.

5. *Федяев А.А.* Проблемы эффективности термовлажностной обработки пилопродукции в крупногабаритных сушилках // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции 24-26 мая 2023 г. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2023. – С. 677-679.

6. *Федяев А.А., Федяева В.Н., Федяев П.А.* Расчетные исследования нестационарного внутреннего влаго- и теплопереноса коллоидных тел // Труды Братского государственного университета: Серия Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. – Братск: БрГУ, 2006. – Т.2. – С. 120 – 125.

7. *Федяев А.А., Федяева В.Н., Федяев П.А.* Программное обеспечение для исследования процессов теплопереноса в зонах термообработки пористых материалов // Труды Братского государственного университета: Серия Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. – Братск: БрГУ, 2017. – Т.1. – С. 63 – 68.

8. *Федяев Ал.А., Гончарова Н.А., Федяев П.А., Павликова С.Ю., Игнатьева С.М.* Моделирование рациональных режимов работы высокотратных сушильных машин // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2024 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2025. – С. 298-304.

Сведения об авторах

ФИО	Федяев Александр Арурович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова.
Адрес организации	194021, Институтский переулок, д.5. г. Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	4618-5907
e-mail	vends1@mail.ru
ФИО	Гончарова Наталья Алексеевна
Организация	Братский государственный университет
Адрес организации	665709, ул. Макаренко, д.40., г. Братск Иркутской области, Россия
SPIN-код	3424-6110
e-mail	vends1@mail.ru

ФИО	Федяев Павел Александрович
Организация	Братский государственный университет
Адрес организации	665709, ул. Макаренко, д.40., г. Братск Иркутской области, Россия
SPIN-код	5409-4676
e-mail	vends@mail.ru

ФИО	Григорьева Татьяна Анатольевна
Организация	Братский государственный университет
Адрес организации	665709, ул. Макаренко, д.40., г. Братск Иркутской области, Россия
SPIN-код	7554-9012
e-mail	umubrgu@mail.ru

ФИО	Трифонов Никита Игоревич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М.Кирова
Адрес организации	194021, Институтский переулок, д.5. г. Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	6203-4329
e-mail	vends1@mail.ru

Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований, свидетельствующие о наличии неравномерных профилей газообразного энергоносителя в крупногабаритных сушильных камерах, в том числе и с отрицательными значениями векторов скорости и оценка влияния этого фактора на время сушки пиломатериалов. Дана экономическая оценка величины получения некондиционной продукции и объема повышенного технологического брака при термообработке пористой продукции.

Ключевые слова: аэродинамическая ситуация, профили скорости, термообработка пиломатериалов, экспериментальные исследования, время сушки.

УДК 66.33.31

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.33.31

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОГО ТЕПЛОМАССООБМЕНА ПРИ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ ДРЕВЕСИНЫ

Федяев Ал.А., Гончарова Н.А., Федяев П.А.,
Игнатьева С.М., Трифонов Н.И.

Введение.

Определение эффективности энерго- и ресурсосбережения при термовлажностной обработке древесины достаточно быстро и с минимальными затратами материальных и финансовых ресурсов возможно выполнить при использовании математических моделей. При рассмотрении в частности нестационарного тепломассообмена в проточных частях теплотехнологического деревообрабатывающего оборудования необходимо учитывать ряд факторов, прежде всего, таких как конвективный массоотвод, меняющиеся физические условия теплоподвода, переменное начальное влагосодержание сушеного материала, порода древесины для термообработки и т.д. Решение (учет влияния) каждой из перечисленных позиций является сложной задачей, требует значительных усилий, а часто и неосуществимо на практике. Поэтому использование математических моделей нередко является единственным вариантом, тем более, когда необходимо решать одновременно два и более, отмеченных выше факторов. Применительно к такому сложному процессу, каким является сушка древесных материалов, использование таких моделей связано с решением нелинейных дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса. При этом во времени и в пространстве меняются нестационарные поля физических величин – градиенты температуры, концентрации, влагосодержания пористого древесного материала и др.

Процессы термовлажностной обработки пиломатериалов [1], которых ежегодно производится до 30 млн. кубических метров, являются так называемыми низкотемпературными процессами. Нерациональные материальные и финансовые затраты, вызванные неравномерным теплотехнологическим процессом [2,3], а также нерациональной организацией самого процесса деревообрабатывающих предприятий доходят до 15%, а нередко и более от стоимости готовой пилопродукции.

На процессы сушки изделий из древесины расходуется львиная доля энергетических и других затрат - до 50% и более, что обусловлено постоянно повышающейся ценой всех видов энергии, расходуемой прежде всего: на процессы для нагрева и удаления влаги из пористого материала; потери готовой продукции в виде некондиции (коробление, трещинообразование, изменение цвета и др.).

Как правило, имеет место и низкая эффективность проведения самого технологического процесса термовлажностной обработки древесины.

Цель работы – моделирование неравномерного тепломассообмена при термовлажностной обработке древесины.

Результаты исследований.

Анализ данных ряда исследований указывает, что существенный рост энергетических и других затрат нередко связан с неравномерным энергоподводом, который в свою очередь всегда зависит от аэродинамики рабочей камеры. Последнее предопределяет нерасчетные режимы подачи энергоносителя заданных параметров и связанные с этим рациональные пределы изменения физических параметров [2,4].

Переменные параметры энергоносителя однозначно приводят и к изменению физических полей, прежде всего, это градиенты влагосодержания и температуры (наиболее значимые) внутри пористого древесного материала.

Нерациональное (нерасчетное) изменение полей влагосодержания и температуры в свою очередь провоцирует усиленную деформацию внутренних структур пористого материала за счёт появления больших сил поверхностного напряжения и их нарушение - трещинообразование, коробление, изменение цвета, что ведет в свою очередь к росту составляющей технологического брака готовой продукции.

Также сказанное выше приводит и к нерасчетному росту энергетических и эксплуатационных затрат при паразитном увеличении времени сушки для выравнивания влагосодержания по телу пористого древесного материала.

Наиболее эффективный метод устранения внеплановых градиентов полей влагосодержания и температуры – это рациональная аэродинамика в зонах сушки, то есть равномерные профили скорости энергоносителя прежде всего по высоте штабеля пиломатериала. Но оперативно менять контуры скоростного профиля в рабочей камере можно только при математическом моделировании и его корректировке по длине в соответствующих сечениях, для чего его (профиль) надо представить в функциональной форме.

Из данных экспериментальных исследований известно, что форма аэродинамического профиля скорости сильно зависит от выбранных сечений по длине сушильной камеры и может быть практически любой конфигурации. Традиционные методы интерполяции для таких вариантов не учитывают амплитуды поведения графика на концевых участках [5], а

Для описания поля сложной формы (динамического профиля) с достаточной математической точностью использована обрабатывающая программа специального назначения, где в основе математической модели предложен метод «интерполяции сплайнами». При представлении профиля практически любой сложности в функциональной форме, при сравнении с любыми другими методами, существенными преимуществами метода «интерполяции сплайнами» является: более корректное, по сравнению с существующими методами аппроксимации, описание функций на межузловых участках; независимость от промежутков снятия значений (для обычных методов аппроксимации они должны быть постоянными); упрощенная версия реализации на вычислительной технике и в «ручных» расчётах.

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_2(x) = a_2 + b_2 \cdot (x - x_1) + c_2 \cdot (x - x_1)^2 + d_2 \cdot (x - x_1)^3 \\ \varphi_3(x) = a_3 + b_3 \cdot (x - x_2) + c_3 \cdot (x - x_2)^2 + d_3 \cdot (x - x_2)^3 \\ \varphi_4(x) = a_4 + b_4 \cdot (x - x_3) + c_4 \cdot (x - x_3)^2 + d_4 \cdot (x - x_3)^3 \\ \\ \varphi_i(x) = a_i + b_i \cdot (x - x_{i-1}) + c_i \cdot (x - x_{i-1})^2 + d_i \cdot (x - x_{i-1})^3 \end{array} \right.$$

x, x_1 - искомое значение и значение в предыдущей узловой точке, соответственно.

Принудительно выделенный отдельный сплайн, ограничительные точки А и С (рис.1).

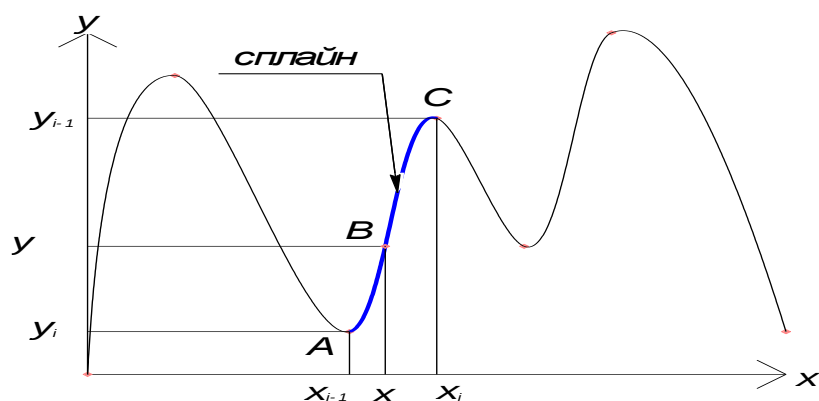


Рис. 1. Выделенный сплайн, отдельно расположен между точками A и C

Положение точки B, расположенной в промежутке между точками A и C, определяется функцией, имеющей вид:

$$y = a_2 + b_2 \cdot (x - x_1) + c_2 \cdot (x - x_1)^2 + d_2 \cdot (x - x_1)^3. \quad (1)$$

Поведение предыдущих и последующих сплайнов учитывается в граничных точках в системе уравнений и позволяет добиться плавного перехода от одного сплайна к другому. Тогда возможно обусловить использование всего трёх точек для описания поведения функции в межузловом пространстве. При этом соответственно снижается и амплитудное отклонение, неизбежное при полиномиальном интерполировании, где понадобилось бы число точек равное как минимум количеству экстремумов.

Тогда, зная коэффициенты a_i, b_i, c_i, d_i и промежуток, на котором эти коэффициенты действительны, получаем математическое выражение, описывающее поведение функции на данном промежутке.

В работе в обрабатывающей программе специального назначения представлена вероятность вывода данных коэффициентов и промежутков для них при помощи стандартного ActiveX компонента MSFlexGrid, при помощи которого также осуществляется ввод данных для дальнейшего расчёта. Решение системы уравнений представлено методом «прогонки», являющегося частным случаем метода Гаусса для решения системы линейных уравнений.

Для исследования профилей скорости различной сложности (то есть полей переменных физических величин) далее используется отдельная расчетная программа, главной целью которой является подача исходных кривых любой сложности для дальнейшего использования эмпирических зависимостей в виде кубических полиномов, способная представить реальный процесс с большой точностью. Тогда появляется возможность

дальнейшей математической обработки исследуемых динамических профилей скорости.

После проведения обработки результатов данной работы по отмеченной выше программе была получена возможность анализа профилей скоростей сушильного агента в конвективных сушильных установках для термообработки, в частности пиломатериалов. Последнее позволяет в свою очередь определить особенности сложной формы анализируемых в работе профилей физических величин и выполнить необходимую корректировку в соответствующих секторах графика.

Заключение.

Полученные при моделировании профили скорости и др. параметры, позволяют в дальнейшем осуществлять более равномерный энергоподвод к материалу, а, следовательно, снизить градиент влагосодержания, что в конечном итоге приведёт к уменьшению степени деформации древесины в процессе термовлажностной термообработки. Последнее также ведет к снижению таких значимых изъянов как коробление и растрескивание пористых материалов [5].

Кроме того, при более равномерной термообработке снижается необходимость в увеличении продолжительности данного процесса, вызванной необходимостью дополнительной термообработки зон штабеля пилопродукции, находящихся в области неравномерных скоростей сушильного агента, что ведёт, в свою очередь, к пересушке кондиционного материала в областях с завышенными скоростями сушильного агента.

Производственный процесс роста продолжительности сушки можно называть «паразитным удлинением сушки», которого можно избежать выравниванием, либо корректировкой профилей скоростей сушильного агента на протяжении процесса сушки. Таким образом, для термообработки одного и того же объёма древесины потребуется меньшее время, что приводит к снижению энергозатрат [6-8], а значит и себестоимости готовой продукции при термовлажностной обработке.

Библиографический список

1. *Серговский П.С., Расев А.И.* Гидротермическая обработка и консервация древесины: учебник для вузов. – 4 –е изд., перераб. и доп. – Москва: Лесн. Пром- сть, 1987. – 360 с.
2. *Федяев А.А.* Оптимизация тепловой сушки пиломатериалов в условиях поперечной неравномерности // Труды 1-й Международной

научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)». – Москва: МГАУ, 2002. – Т.2. – С. 168–171.

3. *Федяев Ал.А., Григорьева Т.А., Ульянов А.Д., Павликова С.Ю.* Математическое моделирование и анализ графических зависимостей управляемых рабочих сред в камерах котлоагрегатов // Автоматизация в промышленность, 2024. – Том 12. – С. 16-20.

4. *Видин Ю.В., Злобин В.С., Федяев А.А.* Аналитический метод расчета нестационарного температурного поля при переменном коэффициенте теплопроводности // Системы. Методы. Технологии, 2019. – № 1 (41). – С. 57-60.

5. *Мудров А.Е.* Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. – Томск: МП «РАСКО», 1991. – 272 с.

6. *Федяев А.А.* Совершенствование газораспределительных устройств технологического оборудования // Системы. Методы. Технологии, 2009. – №2. – С.86–89.

7. *Федяев А.А., Федяева В.Н.* Энергосбережение при термовлажностной обработке ленточных капиллярно-пористых материалов // Труды БрГУ. Серия: Естественные и инженерные науки, 2014. – Т.1. – С.36 – 40.

8. *Федяев А.А.* Проблемы эффективности термовлажностной обработки пилопродукции в крупногабаритных сушилках // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2023. – С. 677-679.

Сведения об авторах

ФИО	Федяев Александр Арурович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова.
Адрес организации	194021, Институтский переулок, д.5. г. Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	4618-5907
e-mail	vends1@mail.ru

ФИО Гончарова Наталья Алексеевна
Организация Братский государственный университет
Адрес организации 665709, ул. Макаренко, д.40., г. Братск Иркутской области, Россия
SPIN-код 3424-6110
e-mail vends1@mail.ru

ФИО Федяев Павел Александрович
Организация Братский государственный университет
Адрес организации 665709, ул. Макаренко, д.40., г. Братск Иркутской области, Россия
SPIN-код 5409-4676
e-mail vends@mail.ru

ФИО Игнатъева Светлана Михайловна
Организация Братский государственный университет
Адрес организации 665709, ул. Макаренко, д.40., г. Братск Иркутской области, Россия
SPIN-код 7554-9012
e-mail umubrgu@mail.ru

ФИО Трифонов Никита Игоревич
Организация Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М.Кирова
Адрес организации 194021, Институтский переулок, д.5. г. Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код 6203-4329
e-mail vends1@mail.ru

Аннотация

Разработан программный продукт использования математической модели, связанной с решением нелинейных дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса в процессах сушки древесины. Программа

осуществляет при изменении характеристик термодинамических систем описание профилей скорости практически любой сложности. Исходные сложные кривые представляются для дальнейшего использования эмпирических зависимостей в виде кубических полиномов, которые представляют реальный нелинейный процесс с большой точностью. Полученные данные позволяют осуществлять дальнейшую математическую обработку исследуемых динамических профилей скорости.

Ключевые слова: расчетная программа, математическая модель, сушка древесины, неравномерные профили скорости, «интерполяция сплайнами».

УДК 533.244

Разделы рубрикатора ГРНТИ 533.244

СНИЖЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ В МАШИНАХ КАМЕРНОГО ТИПА ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ ПИЛОПРОДУКЦИИ

**Федяев Ал.А., Цымбалов С.Д., Федяева В.Н., Григорьева Т.А.,
Трифонов Н.И.**

Введение.

При термовлажностной обработке различного сортамента древесных материалов в камерных сушильных машинах конвективного типа, помимо эксплуатационных непроизводительных потерь актуальным является вопрос снижения технологического брака, который по разным оценкам при работе теплотехнологического оборудования может варьироваться в пределах от 3 до 5% и даже выше [1,2]. Тем более что все более значимой становится на лесопромышленных предприятиях доля лесоматериала, отправляемого на тепловую и механическую обработку по сравнению с отправкой необработанного сырья на экспорт.

Применяемые для поставленной задачи разнообразные сушильные машины (СМ), отличаются весьма различными способами сушки древесных материалов: конвективная, контактная, в поле токов высокой частоты, индукционная, ротационная, радиационная, а также атмосферная, камерная и др. Подавляющее применение получила камерная конвективная сушка

(порядка 95%), проводимая в специальных отапливаемых цехах или в виде отдельно стоящих сооружений.

Как известно при тепловой сушке в качестве газообразного энергоносителя используется нагретый атмосферный воздух (неисчерпаемый в природе источник энергии, что весьма важно), что обуславливает его широкое применение, существенно реже смесь топочных газов с воздухом (провоцирует загрязнение сушеного материала), или перегретый пар (атмосферное давление). Технологический процесс сушки при этом практически не зависит от климатических и погодных данных, как правило, подлежит оперативной корректировке [3,4] и позволяет получить кондиционную древесную продукцию с заданным конечным влагосодержанием в проектном диапазоне.

Помимо оперативного удаления влаги из древесного материала при тепловой сушке (многократно ускоряет неизбежный процесс обезвоживания в атмосферных условиях) и его превращения в промышленный материал, подлежащий в дальнейшем специальной обработке, древесина вследствие тепловой сушки приобретает целый ряд положительных свойств. Среди них: сохранение точных размеров и заданной геометрии отдельных элементов в изделиях; качественная механическая стойкость; хорошая обработка деталей на деревообрабатывающих станках; низкая теплопроводность, электропроводность; достаточно высокая теплота сгорания отходов производства и что немаловажно - стойкость против гниения.

При некорректном проведении процесса сушки по профилю сортамента пиломатериала появляются пластевые, кромочные и торцевые типы трещин, а также коробление (например, доски).

Цель работы – оценка эксплуатационных затрат в машинах камерного типа при термообработке пилопродукции.

Результаты исследований.

Процесс тепловой сушки древесины (один цикл сушки) состоит из ряда основных этапов (рис. 1). Здесь этапы сушки представлены в графическом варианте в виде диаграммы изменения влагосодержания материала от времени сушки [2,4]. Причем на рисунке представлено две кривые сушки, в том числе для наименее плотной (внешняя часть бревна) заболонной части сушеного материала (рис. 1, а). Как правило, этот фактор при термообработке древесных материалов не учитывается.

Первый этап – прогрев древесины, при котором влагосодержание материала практически не меняется и может даже увеличиться за счёт конденсации влаги из окружающей среды (сушильный агент) на

поверхность холодной древесины (на диаграмме не показан в силу незначительности по времени в сравнении с 1-м и 2-м периодами).

Второй этап – это непосредственно период (первый период) наиболее интенсивной сушки пористого материала от высокого начального влагосодержания до, так называемого критического влагосодержания (окончание первого периода). На этом этапе из древесины удаляется свободная влага.

Далее протекает более медленная сушка материала от критического влагосодержания до заданного конечного (начало второго периода). На данном этапе удаляется связанная влага.

И, наконец, последний этап – это кондиционирование и остывание древесины (третий период, на диаграмме не указан).

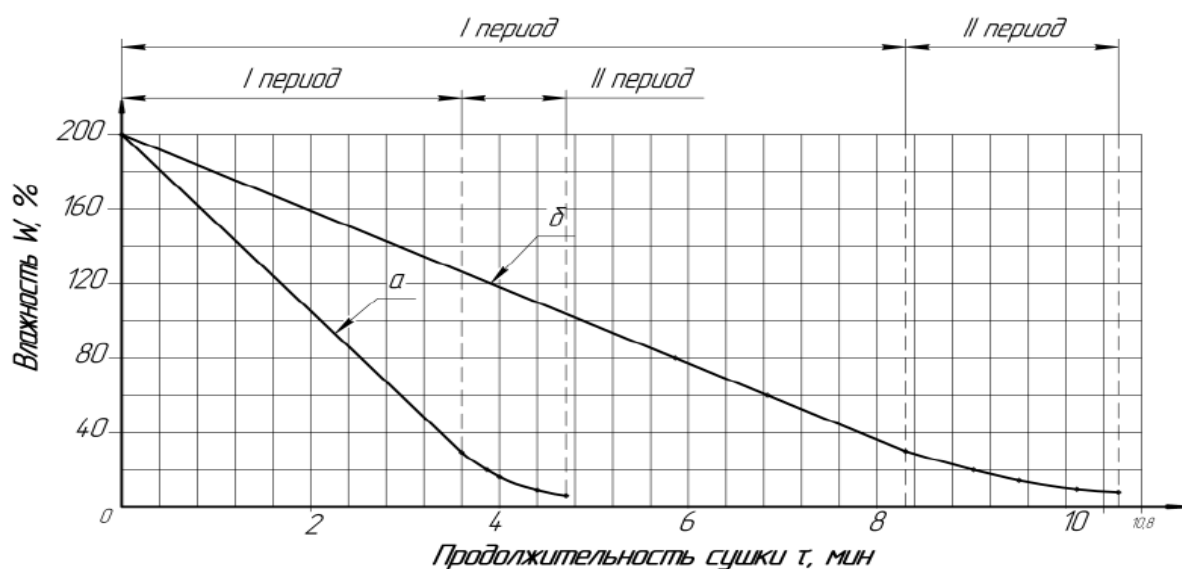


Рис. 1. Время термообработки древесины с учетом разделения по плотности материала на части:

а – сушка заболони; б – сушка ядра.

Как следует из представленной диаграммы продолжительность сушки указанных частей пористого материала отличается в разы, а значит заболонная часть материала многократно пересушивается, т.е. имеют место существенные непроизводительные затраты энергоресурсов при сушке древесины.

Таким образом, основной задачей технологического процесса тепловой сушки пиломатериалов является получение их неизменной формы практически в сухом виде с заданными потребителем качествами.

Проектное конечное влагосодержание существенно зависит от дальнейшего использования (например, диапазон для транспортного влагосодержания).

В качестве примера в работе рассматривается крупногабаритная сушильная установка для древесины итальянской фирмы Sesea камерного типа со стандартной компоновкой циркуляции агента сушки – продольной (рис. 2). Сушильная установка выполнена полностью из алюминия (что важно при наличии постоянной влажной внутренней среды), термически изолирована панелями из минеральной ваты и дополнена автоматическим управлением технологического процесса с помощью компьютерной программы. Теплоносителем для нагрева газообразного сушильного агента в калориферах СМ служит вода с параметрами $P = 6 \text{ кгс/см}^2$; $t = 95 \text{ }^\circ\text{C}$.

Проектное значение скорости потока воздуха в камере СМ в среднем равна 3,3 м/с. В каждой камере (всего их две, соединены между собой) СМ расположено два водо-воздушного калорифера, выполненных из нержавеющей стали, с алюминиевым оребрением для интенсификации процесса теплопередачи по воздушной стороне.

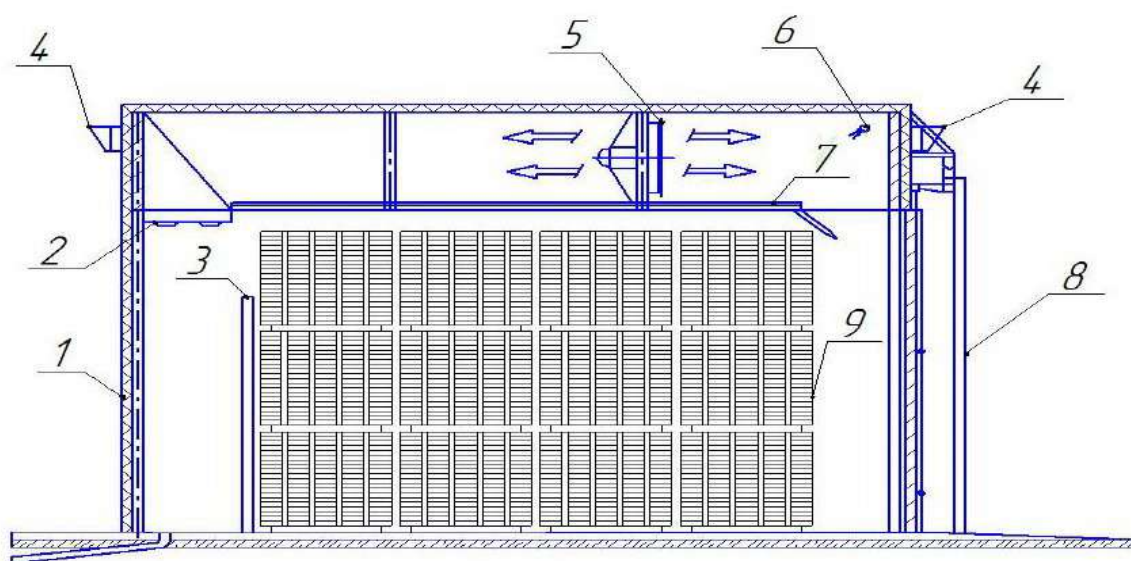


Рис. 2. Продольный разрез камеры сушки итальянской фирмы Sesea:

- 1 – термически изолированная панель; 2 – теплообменники (калориферы);
3 – ограничитель загрузки; 4 – воздуховоды; 5 – вентиляторы; 6 – распылитель
влаги; 7 – подвижный потолок; 8 – откатные ворота из панелей; 9 – штабель

В каждой камере помещается по 24 штабеля пиломатериала, в пересчёте на кубатуру, при толщине доски, например 50 мм, это составит порядка 91,6 м³. Также камеры СМ оснащены реверсивными вентиляторами диаметром 900 мм, по 4 штуки на камеру, мощностью по 5,5 кВт и производительностью 42500 м³/час каждый. Камера предназначена для

сушки древесины различных категорий качества, в нашем случае это сосна, как правило, экспортной категории [2].

Проведенный анализ результатов исследований дает шанс выделить ряд рабочих параметров, рассмотрение которых позволяет определить приоритетные направления для наиболее существенного снижения эксплуатационных затрат: оценить эффективность аэродинамических характеристик СМ; составить математическую модель [5]; адаптировать программу для теплового и аэродинамического расчета конкретной СМ. При параметрических исследованиях по специальной программе оценивается влияние конфигурации профилей скорости, а значит и подвода тепла, по длине рабочей камеры на интенсивность сушки и, соответственно, величину технологического брака. На следующем этапе определяется степень влияния на внешние тепловые потери СМ утеплителей с более низкими коэффициентами теплопроводности.

Заключение.

Совершенствование режимов работы СМ для снижения величины технологического брака (в установках фирмы Sesea - это 300 м³/год и более) выполняется на основе и по результатам, в частности, экспериментальных исследований по аэродинамике в сушилках, степени равномерности профилей скорости сушильного агента по высоте штабеля пиломатериала. Последнее однозначно влияет на энергоподвод в процессе сушки, ответственно и на некондиционные параметры готовой продукции [6], которые достигают в отмеченных выше крупногабаритных установках 3-5 % и более.

Библиографический список

1. *Пейч Н.Н., Царев Б.С.* Сушка древесины. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, 1971. – 220 с.
2. *Богданов Е.С., Козлов В.А., Кунтыш В.Б., Мелехов В.И.* Справочник по сушке древесины: под редакцией Богданова Е.С. – 4-е изд. Перера. и доп. – Москва: Лесная промышленность, 1990. – 304с.
3. *Кречетов И.В.* Сушка древесины. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Лесная промышленность, 1980. – 432 с.
4. *Лыков А.В.* Теория сушки. – Москва: Энергия, 1968. и доп. 472 с.
5. *Федяев А.А., Федяева В.Н.* Математическое моделирование подачи энергоносителя в камерах сушки // Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: материалы XV (XXXVII) Всероссийской научно-технической конференции. – Братск: Изд-во БрГУ, 2016. – С. 47-48.

6. *Федяев А.А., Федяева В.Н., Федяев П.А.* Программное обеспечение для исследования процессов теплопереноса в зонах термообработки пористых материалов // Труды БрГУ: Серия Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири, 2017. – Т.1. – С. 63–68.

Сведения об авторах

ФИО	Федяев Александр Арурович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова.
Адрес организации	194021, Институтский переулок, д.5. г. Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	4618-5907
e-mail	vends1@mail.ru
ФИО	Цымбалов Сергей Дмитриевич
Организация	Нижегородский государственный педагогический университет им. Козьмы Минина» (Мининский университет).
Адрес организации	603000, ул. Ульянова, д.1, Нижегородская область, г. Нижний Новгород, Россия
SPIN-код	4611-0012
e-mail	sergey.cymbalov@mail.ru
ФИО	Федяева Валентина Николаевна
Организация	СПбГБПОУ «Охтинский колледж».
Адрес организации	195267 ул. Ушинского, д.16 лит.А., г. Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	6449-1471
e-mail	vends1@mail.ru
ФИО	Григорьева Татьяна Анатольевна
Организация	Братский государственный университет
Адрес организации	665709, ул. Макаренко, д.40., г. Братск Иркутской области, Россия
SPIN-код	3424-6110
e-mail	umubrgu@mail.ru

ФИО	Трифонов Никита Игоревич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М.Кирова
Адрес организации	194021, Институтский переулок, д.5. г. Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	6203-4329
e-mail	vends1@mail.ru

Аннотация

Наиболее значимым для снижения эксплуатационных затрат является эффективная аэродинамика сушильной камеры, способствующая равномерному энергоподводу. Полученные экспериментальные данные позволяют осуществлять дальнейшую математическую обработку исследуемых динамических профилей скорости, совместно с другими переменными факторами, отмеченными в работе, в конечном итоге снижается технологический брак и достаточно существенно время сушки пиломатериала.

Ключевые слова: профиль скорости; сушильные машины; подвод теплоты; брак продукции; древесные материалы.

УДК 674.047

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.33.31

МЕТОДИКА СИЛОВОГО АНАЛИЗА НАГРУЗОК, ДЕЙСТВУЮЩИХ ПРИ ПРОФИЛИРОВАНИИ ДРЕВЕСИНЫ

Хрусталева И.В.

Введение.

Одним из видов профилирования древесины является прокатка. Для процесса прокатки древесины характерны некоторые особенности, которые необходимо учитывать при составлении модели.

Во-первых, в процессе сжатия древесины имеется одновременное действие упругой и пластической деформаций, к тому же зависимости между напряжением и деформациями нелинейные.

Во-вторых, древесина обладает ярко выраженными реологическими свойствами, т.е. ее свойства меняются во времени и зависят от скорости деформации.

В-третьих, пластическая деформация связана с изменением объема и плотности материала вследствие возможного выдавливания жидкой фракции.

В-четвертых, древесина обладает анизотропными свойствами.

В-пятых, процесс прокатки древесины может происходить в свободно вращающихся валках, которые вращаются под действием сил давления на проталкиваемый материал, в отличие от прокатки металла, где движение заготовки происходит за счет возникающих сил трения при принудительном вращении валков.

Цель работы – разработка методики силового анализа для более полного и точного анализа действующих сил при прокатке древесины.

Методы исследования.

Основу этой методики составляет математическое описание процесса силового взаимодействия в рабочей зоне деформируемой заготовки и элементов конструкции. В указанной зоне заготовка представляется в виде дискретных объемных элементов, учитывающих условия силового взаимодействия на ограничивающих поверхностях соседних элементов и цилиндрических поверхностях прокатных валков. Такое разбиение дает возможность определить характеристики напряженного состояния древесины с любой требуемой степенью точности. Соответствующая расчетная схема изображена на рис. 1, где ось X направлена по движению заготовки, а оси Y и Z образуют перпендикулярную плоскость.

Результаты исследования.

При составлении математической модели были приняты следующие допущения: гипотеза плоских сечений; проскальзывание между древесиной и валками не учитывается; скорость процесса деформирования незначительна, что позволяет рассматривать процесс прокатки как квазистатический; зависимость между деформацией и нагрузкой принимается нелинейной, а ее конкретная реализация определяется либо по справочным данным [1] либо экспериментально; упругая и пластическая деформация пропорциональны общей с коэффициентом пропорциональности K .

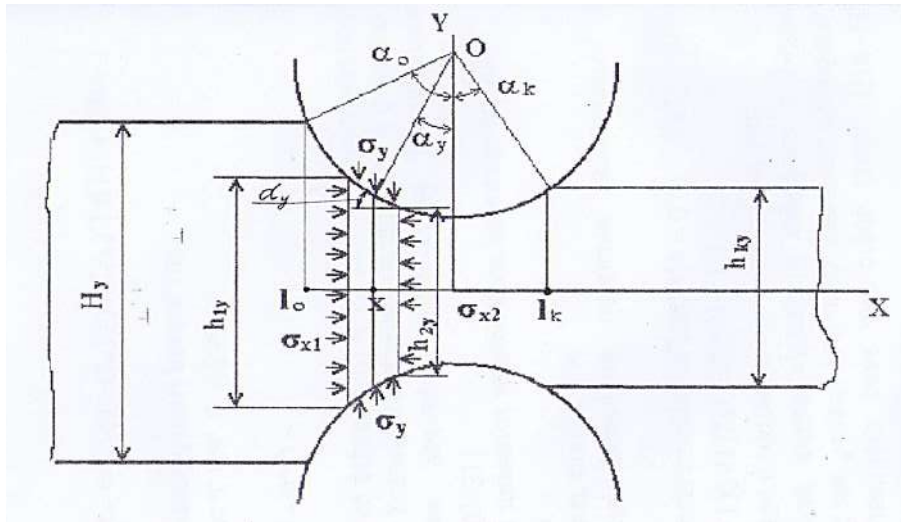


Рис. 1. Расчетная схема в плоскости XOY.

Для выделенного малого объема ΔX (рис. 1) относительные деформации запишутся в виде

$$\varepsilon_y = \frac{H_y - h_{y(x)}}{H_y}; \quad \varepsilon_z = \frac{H_z - h_{z(y)}}{H_z}, \quad (1)$$

где $h_{y(x)}$, $h_{z(y)}$ – текущие размеры заготовки по координатам X и Y ;
 H_y , H_z – исходные размеры заготовки.

Уравнение равновесия для выделенного объема ΔX с учетом принятых допущений запишется в следующем виде:

$$h_{1y}h_{1z} - \sigma_{x2}h_{2y}h_{2z} - \sigma_y \operatorname{tg}(\alpha_y)h_{1z}(h_{1y} - h_{2y}) - \sigma_z \operatorname{tg}(\alpha_z)h_{1y}(h_{1z} - h_{2z}) = 0 \quad (2)$$

где h_{1y} , h_{1z} , h_{2y} , h_{2z} – соответственно начальное и конечное значение размеров выделяемого объема;

$\alpha_{y(z)}$ – значения углов в соответствии с рис.1;

$\sigma_{x(y,z)}$ – напряжения вдоль осей X , Y , Z .

При этом общая деформация по оси Y будет равна

$$E_y = \varepsilon_y + \mu_{zy}\varepsilon_z + \mu_{xy}\varepsilon_x, \quad (3)$$

где μ_{zy} и μ_{xy} – коэффициенты поперечной деформации, вызываемые напряжениями σ_z и σ_x .

На основании предварительных расчетов и данных работы [2] можно предположить, что $\mu_{xy}\varepsilon_x = \mu_{xz}\varepsilon_x \approx 0$.

И тогда

$$\begin{cases} E_y \approx \varepsilon_y + \mu_{zy}\varepsilon_z \\ E_z \approx \varepsilon_z + \mu_{yz}\varepsilon_y \end{cases} \quad (4)$$

Значения нормальных напряжений $\sigma_y(E_y)$ и $\sigma_z(E_z)$ могут быть определены из уравнения, связывающего напряжения и деформацию. Как правило, для древесины [3] эта зависимость имеет нелинейный характер и для практических расчетов аппроксимировалась полиномиальной зависимостью.

Условия замкнутости системы алгебраических уравнений для N дискретных элементов, будет иметь вид

$$\sigma_{x2}^i = \sigma_{x1}^{(i+1)}, \quad (5)$$

где i – номер выделенного участка.

При этом, соответственно, граничными условиями на первом и последнем участке будут:

$$T = \sigma_{x1}^1 H_y H_z ; \quad \sigma_{x2}^N = 0, \quad (6)$$

где T – искомое значение осевой силы, которое определяется с помощью рассмотренной ниже процедуры вычислений.

Система уравнений легко разрешается с помощью рекуррентных формул. Используя граничные условия на выходе из клетки, получаем, что напряжение σ_{x2}^N равно нулю. Затем находим из уравнения (2) напряжения σ_{x2}^{N-1} , а через это значение находим σ_{x2}^{N-2} . Процесс вычислений продолжается пока не будет получено напряжение на входе в клетку σ_{x1}^0 .

В свою очередь, компоненты нормальной силы P определяются из выражений

$$\begin{cases} P_y = \int_{l_0}^{l_x} \sigma_y B_y dx \\ P_z = \int_{l_0}^{l_x} \sigma_z B_z dx \end{cases}, \quad (7)$$

где $B_y(z)$ – ширина валков по осям Y и Z .

Используя полученные выше уравнения для каждого из N участков с учетом очевидных геометрических соотношений, определяются значения сил P и T . При этом, интегралы в выражениях (6) вычисляются по методу трапеций с учетом известных значений на концах $\sigma_y^1 = \sigma_y^N = 0$.

Для предлагаемого метода решения поставленной задачи важным является вопрос о выборе числа разбиений исследуемой области на элементы. Выполненный расчетный анализ сходимости показал, что для получения точности порядка 0,1% достаточно 30-40 элементов. В данном случае число разбиений принималось равным 100, что обеспечивало

получение интегральных характеристик с точностью до 4-5 верных знаков после запятой.

Для бруса квадратного сечения анализ полученных теоретических зависимостей более целесообразно производить на основании данных, обладающих большей общностью. С этой целью модель рекомендуется привести к безразмерному виду с использованием определяющего геометрического размера «С» - равного просвету между валками. Относительная величина осевой силы имеет размерность напряжения и равна

$$\bar{T} = T/c^2 . \quad (9)$$

Наибольшее и однозначное влияние оказывает степень деформации, причем все силовые характеристики нелинейны.

На основании анализа можно считать, что рациональным будет выбрать диаметр валков $\bar{D} = (2,5 - 3,5)C$.

Заключение.

Математическая модель силового взаимодействия валков с заготовкой в процессе прокатки круглой древесины в прямоугольный брус может быть представлена в виде дискретных объемных элементов с соблюдением соответствующих краевых условий на границах элементов. Для теоретического анализа удобным является представление модели в безразмерной форме. Результаты анализа позволяют рекомендовать с целью уменьшения осевых сил и, соответственно, габаритов и энергоемкости подающего механизма рациональные диаметры валков в диапазоне $(2,5-3,5)C$.

Библиографический список

1. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине. – Москва: Лесная промышленность, 1989. – 294 с.
2. Махова Т.А., Тутыгин А.С., Айзеништадт А.М. Древесина как строительный материал: учебное пособие. – Архангельск: САФУ имени С.В. Ломоносова, 2017. – 109 с.
3. Уголев Б.Н., Санаев В.Г., Горбачева Г.А., Белковский С.Ю. Исследование удельной поверхности древесины методом низкомолекулярной адсорбции криптона при различных проявлениях эффекта памяти древесины // Научные труды Московского государственного университета леса. – Москва: МГУЛ, 2015. – № 377. – С. 17-24.

Сведения об авторе

ФИО	Хрусталева Иннесса Владимировна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д.5, Санкт-Петербург Россия
SPIN-код	8636-3860
e-mail	innessachrustaliova@yandex.ru

Аннотация

Для более полного и точного анализа действующих сил была разработана методика силового анализа. Математическая модель силового взаимодействия валков с заготовкой в процессе прокатки круглой древесины в прямоугольный брус может быть представлена в виде дискретных объемных элементов с соблюдением соответствующих краевых условий на границах элементов. Для теоретического анализа удобным является представление модели в безразмерной форме.

Ключевые слова: математическая модель, древесина, прокатка, напряжения, степень деформации.

УДК 621.771.06

Разделы рубрикатора ГРНТИ 53.43.13

СОКРАЩЕНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА ОБЪЕМОВ ЛЕСОПРОДУКЦИИ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Януш С.Ю.

Введение.

Основными потребителями древесины в России и СССР являлись: строительная, деревообрабатывающая, целлюлозно-бумажная и мебельная отрасли промышленности, железнодорожный транспорт, судостроение, машиностроение, горно- и нефтедобывающая промышленность и многие

другие. В прошлом столетии большое количество древесины перерабатывалась на пиломатериалы - пиленные, колотые, лущеные и другие.

Объем выработки пилопродукции царской России находился на уровне 14 млн м³/год, на всем пространстве СССР более 110 млн м³/год, а в современной России составляет порядка 28млн м³/год.

В данной статье рассматриваются вопросы, повлиявшие на сокращение объемов переработки древесины из-за применения современных технологий, и научно обосновывается, что применение древесины в те года было востребованным во многих отраслях народного хозяйства.

Цель и задачи исследования – анализ основных отраслей с наибольшими объемами потребления древесины 19-20 вв., рассматривается преимущество технических свойств, повышение срока службы дерева при применении дополнительной обработки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Обосновать выявленные отрасли и продукцию занимавшие основные позиции при переработке древесины.
- 2) Проанализировать технические особенности пилопродукции и качество готовых изделий.
- 3) Произвести расчет выхода готовой продукции, определить эффективность основных свойств древесины.

Методы исследования.

Теоретической и методологической основой исследования были рассмотрены труды в области лесопиления и переработки древесины. В работе использованы методы сравнительного анализа, практического использования, экономической оценки и систематизации данных.

Информационной базой послужили публикации, связанные с применением научно-исследовательских работ при производстве шпалопродукции из древесины и деревянных водопроводных труб.

Результаты исследования.

Железнодорожные деревянные шпалы.

Одними из самых крупных потребителей древесины были предприятия по производству шпал и переводных брусьев для железных дорог широкой и узкой колеи. Шпалы и брусья для стрелочных переводов являются важнейшими элементами верхнего строения железнодорожных путей. Они служат опорой для рельсов, распределяют давление на большую площадь балластного и щебеночного слоя, уравнивая динамическую нагрузку, что необходимо для безопасности движения поездов.

Шпалы представляют собой короткомерные четырехкантные и двухкантные брусья специального сечения (рис.1).



Рис. 1. Шпалы

На производство деревянных шпал ежегодно расходовалось свыше 10 млн м³ крупномерной древесины.

Благодаря достоинствам деревянных шпал (упругость, возможность антисептирования – пропитки для удлинения срока эксплуатации и сравнительная недорогая стоимость) они довольно долго не снимались с производства и использовались при строительстве железных дорог в преобладающих количествах.

В зависимости от назначения деревянные шпалы для железных дорог широкой колеи изготавливались трех типов: для главных путей, для станционных и подъездных путей, для малодеятельных подъездных путей промышленных предприятий. Они отличались размерами.

Шпалы изготавливались из древесины сосны, ели, пихты, лиственницы, кедра, бука, и редко березы. Если сосновые шпалы на железных дорогах в непропитанном виде служили без разрушения в среднем 6-8 лет, то еловые 4-5 лет, лиственничные 8-10 лет, буковые 2-3 года. Продолжительность эксплуатации шпал и брусев в переменных условиях влажности могла быть увеличена путем их консервирования в 2-4 раза, т.е. пропитки химическими веществами-антисептиками. Поэтому основными требованиями к качеству шпал обусловлено, что все шпалы до укладки на путь должны быть пропитаны антисептиком на заводах-изготовителях (рис. 2).

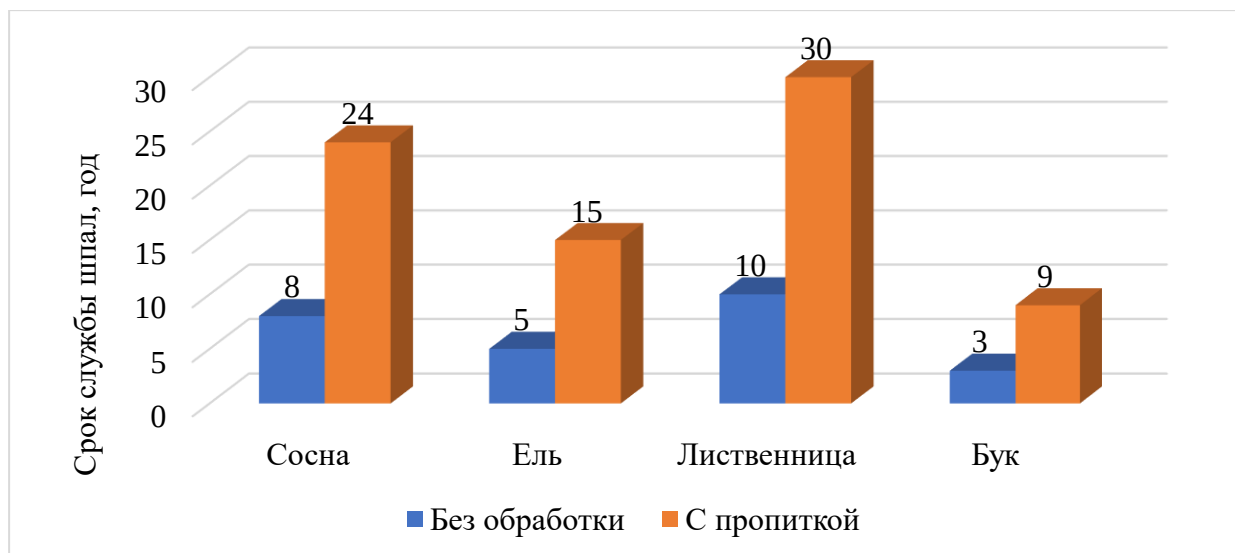


Рис. 2. Средний срок службы шпал из древесины

По влажности древесины шпал ограничений не было. Однако шпалы, поставляемые с влажностью выше транспортной (22%), должны иметь по толщине и ширине установленные стандартами припуски на усушку. Учитывая условия эксплуатации шпал, к качеству древесины предъявляются ограничения в нормах допускаемых пороков. В местах укладок прокладок ограничивались размеры здоровых сучков, не допускались внутренняя твердая и мягкая заболонная гниль, двойная сердцевина. В первом сорте ограничивались наклон волокон, размеры и расположения ложного ядра, трещин, прорости, червоточин, и механических повреждений (затески, зарубы, запилы). Так же были ограничения дефектов обработки: кривизна, непараллельность пластей, скос пропила в боковых сторонах обрезных шпал.

Ширококолейные шпалы вырабатывались на шпалорезных станках в цехах леспромхозов и лесоперевалочных комбинатов и являются продукцией шпалопиления.

Средний объем 1 шпалы колебался от $0,092\text{м}^3$ до $0,123\text{м}^3$ в зависимости шт. шпал.

Также при выработке шпал на шпалорезных станках получались сопутствующие сортименты, идущие преимущественно на повторную разделку: шпальная вырезка – толстые необрезные доски и шпальный толстый горбыль.

Расчет выхода шпальной продукции.

Производство шпал в основном производилось на круглопильных станках.

Размеры шпал с припуском на усушку: толщина $h=180+5$ мм, ширина верхней пласти $b=165+5$ мм.

Ширина пропила с учетом вибрации пильного диска 7 мм.

Удаление метиковых трещин и гнили – вырезка толщиной $60+3$ мм.

Требуемый минимальный диаметр шпального кряжа в верхнем отрубе:

$$D = \sqrt{b^2 + (2h)^2}, \quad (1)$$

где b - ширина верхней пласти, равная 170 мм;

h -толщина шпалы, равная 185 мм.

С учетом двух пропилов и вырезки вторая часть суммы $(2h)$ будет составлять $185 \times 2 + 63 + 7 \times 2 = 447$ мм.

$$D = \sqrt{170^2 + 447^2} = 48 \text{ см.}$$

Объем кряжа $D = 48$ см и при длине $2,75$ м = $0,56 \text{ м}^3$. Объем двух шпал I типа составляет $0,24 \text{ м}^3$. Выход шпал из сырья составляет примерно 43%.

На рис. 3. Представлен выход шпальной продукции из 1 м^3 сырья.

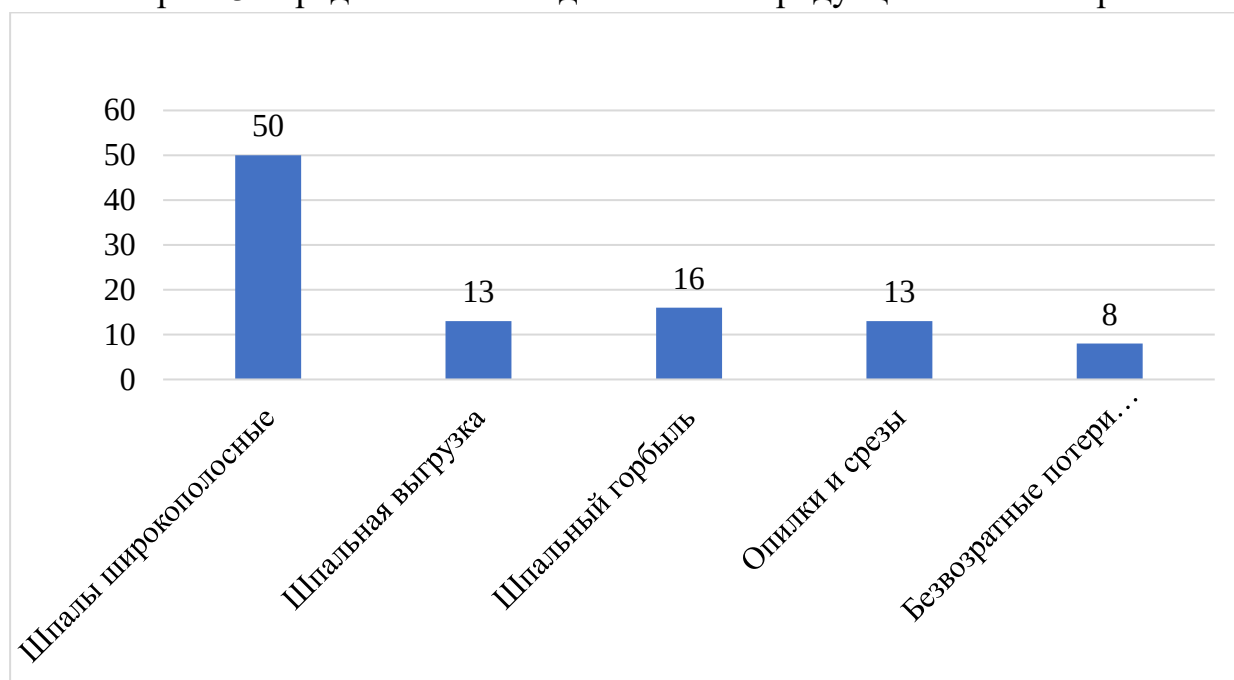


Рис. 3. Выход шпальной продукции из 1 м^3 сырья, %

Деревянные водопроводные трубы.

Еще одним из наиболее востребованным направлением переработки сырья того времени было изготовление деревянных труб (рис. 4).

Уже в древности было известно, что дерево, насыщенное водой, хорошо сохраняется. Поэтому при первых попытках подведения воды, естественно, были применены деревянные трубы. Изготавливались эти трубы двух типов цилиндрической и конической формы и сортамента

длиной до 3 м. просверленных внутри. Размер подобных труб был ограничен размерами дерева и внутренний диаметр труб не превосходил 150мм. Поэтому при проведении больших количеств воды приходилось укладывать рядом несколько линий труб, что вызывало большой расход древесины и являлось большим недостатком сверленных труб. Соединение отдельных звеньев труб осуществлялось путем соответствующей обделки концов труб в виде цапфы и втулки и загонки цапфы во втулку.

Первый водопровод из сверленных труб был построен в Бостоне в 1652 году и просуществовал до 1846 года. В Лондоне деревянные трубы применялись с 1619 года. В России деревянные трубы также нашли применение. Одним из первых был построен Пулковский водопровод в 1810 г.



Рис. 4. Деревянные трубы

Начало нового расцвета строительства деревянных трубопроводов можно отнести к 1850-1870 гг. Начиная с того времени производство деревянных труб быстро развивалось и деревянные трубы находили себе применение в разных отраслях промышленности, для:

- водопроводных линий и городских сетей;
- канализации и отвода сточных вод;
- гидроэлектрических станций;
- передачи горячей воды для целей теплофикации;
- проводки охлаждающих растворов в холодильниках;
- проводки химических растворов;
- землесосных работ;
- зернопроводов на элеваторах;
- подводки конденсационной воды на силовых станциях и для прочих потребностей передачи воды на расстояние.

В 1930 годах деревянные трубы изготавливались из отдельных клепок (рис. 5). На их изготовление в СССР отбирали ровные без ответвлений стволы длиной до 6 м. Дерево, отобранное для клепок, просушивалось на воздухе, затем в печах и только после этого пилилось на доски, которые сортировались и распиливались на бруски. К клепке предъявлялся ряд требований:

1. Дерево должно быть плотным, с прямолинейными слоями, мелкослойное и смолистое. Наивыгоднейшим расположением слоев дерева в клепке являлся случай параллельности слоев поверхности трубы, так как в этом случае утечка воды через поры дерева сокращается до минимума.
2. Дерево должно быть сырорастущим, без смоляных мешков и гнили.
3. Сквозные трещины не допускаются, допускались трещины глубиной не более $1/8$ толщины клепки.
4. Табачные сучки не допускаются.
5. Здоровые, заросшие сучья допускаются лишь при диаметре последних не больше $1/3$ части ширины клепки и на расстоянии не чаще 400мм друг от друга.
6. Сухость древесины – до 15% влаги.
7. Внутренняя и внешняя поверхность клепки должна быть выстругана на специальных станках по строго круговой форме.
8. Боковые плоскости клепки обрабатываются радиально, причем для достижения большей плотности эти плоскости снабжаются шпунтовыми соединениями.



Рис. 5. Соединения клепок деревянных труб

По типам трубы разделялись, на: непрерывные, звеновые, сверленные трубы.

Главными причинами разрушения труб оказались щелочи, содержащиеся в грунтах и разъедающие железные хомуты, а также то обстоятельство, что трубопроводы зачастую работали неполным сечением.

Дополнительно были произведены исследования, которые доказали, что после 12 лет службы правильно построенного трубопровода, плотность деревянных трубопроводов постоянно увеличивается и утечки воды не имеет значимых показателей.

Нагревание воды в деревянных и металлических трубопроводах.

Для предохранения воды в трубопроводах от нагревания в теплое время года, они укладывались на глубину не менее 1,5 м. Коэффициент теплопроводности дерева значительно меньше коэффициента теплопроводности железа.

Коэффициент теплопроводности деревянных труб равен 56; для деревянных труб он сильно колеблется в зависимости от содержания воды в дереве. Для воздушно -просушенного дерева с содержанием влаги 15-20% коэффициент теплопроводности 0,17, для воды 0,51.

Если принять содержание воды в дереве 50%, то коэффициент теплопроводности l выразится:

$$l = 0,17 + \frac{0,51 - 0,17}{100 - 15} (50 - 15) = 0,31$$

При помощи уравнения

$$W = l \times v \frac{(t_a - t_i)}{d} \quad (2)$$

определим количество теплоты проводимое куском трубы в 1 м за один час.

Для чугунной трубы диаметром 375мм и толщиной стенок 14мм

$$W = 56 \times (0,375 + 0,014)n \times \frac{3,3}{0,014} = 16,1 \text{ кДж.}$$

Для деревянной трубы того же диаметра и толщиной стенок в 52мм:

$$W = 0,31 \times (0,375 + 0,052)n \times \frac{3,3}{0,052} = 0,026 \text{ кДж.}$$

Следовательно чугунная труба берет в 620 раз больше тепла из окружающего воздуха, чем деревянная.

Практическое значение полученных величин заключается в том, что деревянные трубы можно укладывать на меньшей глубине.

Свойства деревянных труб.

Дешевизна, большая пропускная способность. Стоимость деревянных трубопроводов больших диаметров на 45% меньше стоимости чугунных и на 33% меньше стальных.

Пропускная способность деревянных труб остается постоянной и в некоторых случаях, увеличивается с течением времени, а металлических труб уменьшается.

Долговечность. Трубы служат 30-40 лет. Только чугунные трубы могут сравниться с деревянными. Износ деревянных труб начинается не с

древесины, а с порчи металлической арматуры, которая может быть заменена на новую. Звеновые трубы служили в среднем 25 лет.

Простота и дешевизна транспорта и укладки. Незаменимое преимущество деревянных труб составляет их меньший вес, который позволяет доставлять их в разобранном виде в самые отдаленные местности. Кроме того укладка деревянных трубопроводов не требовало большого числа высококвалифицированных рабочих и применения механизмов необходимых при кладке металлических трубопроводов.

Простота ремонта и замены частей. В том отношении деревянные трубы были незаменимы, так как любую поврежденную часть легко можно вынуть и заменить новой.

Хорошая сопротивляемость гидравлическим ударам. Плохая теплопроводность дерева позволяет проводить в деревянных трубах горячую воду без применения особой изоляции, а также не опасаться замерзания воды при укладки на поверхности земли (при достаточных скоростях течения).

Сопротивляемость дерева химическим воздействиям. Протекающая по деревянным трубам вода сохраняет свой вкус и свежесть.

Возможность укладки в сырых и болотистых местностях, так как влажный грунт способствует сохранению древесины трубы. Возможность укладки в сильно пересеченной местности и возможность осуществления поворотов.

Список использованных источников

1. *Ярмолинский А.С., Калашников П.Л., Бахтеяров В.Д.* Лесное товароведение. – Москва: Лесная промышленность, 1972. – 207 с.
2. *Деревянные трубы* // Седьмой сборник гидрологогидротехнического института. – Москва: Транспечать НКПС, 1930. – С. 4-51.
4. *Кислый В.В.* Контроль качества продукции лесопиления и деревообработки. – Москва: Высшая школа, 1980. – 192 с.

Сведения об авторе

ФИО	Януш Сергей Юрьевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	8065-2406
e-mail	btkwood@mail.ru

Аннотация

В данной статье рассматриваются вопросы, повлиявшие на сокращение объемов переработки древесины, в частности в шпалопилении и изготовлении водопроводных деревянных труб из-за развития современных технологий, и научно обосновывается, что применение древесины в 19-20 вв. было востребованным во многих отраслях народного хозяйства.

Ключевые слова: сокращение переработки древесины, деревянные водопроводные трубы, железнодорожные деревянные шпалы, свойства древесины.

УДК: 674.093

Разделы рубрикатора ГРНТИ: 66.17.31, 66.03.05

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ КАРТ ЛЕСОСЕК И ОПТИМИЗАЦИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЛЕСА

Авдони́на А.Е.

Введение.

В условиях растущего спроса на лесные ресурсы и повышения требований к экологической устойчивости лесозаготовок особую актуальность приобретает внедрение цифровых технологий в управление лесным хозяйством. Традиционные методы картографирования лесосек и планирования транспортировки леса, основанные на наземных изысканиях и спутниковой съёмке, сталкиваются с рядом существенных ограничений: низкой оперативностью получения данных, недостаточной детализацией изображений, высокой стоимостью работ и сложностью мониторинга труднодоступных участков. Эти факторы приводят к неоптимальному планированию лесозаготовки, увеличению издержек на транспортировку древесины, простоя техники и неэффективному использованию лесных ресурсов.

Применение беспилотных технологий в лесном хозяйстве позволяет не только повысить точность картографических данных, но и существенно сократить временные и финансовые затраты на их получение, обеспечить регулярный мониторинг состояния лесосек, оперативно корректировать планы заготовки и транспортировки в зависимости от меняющихся условий. Внедрение таких решений способствует более рациональному использованию лесных ресурсов, снижению негативного воздействия на экосистемы и повышению общей эффективности лесозаготовительных предприятий — что делает тему исследования значимой как с научной, так и с практической точки зрения.

Цель работы – продемонстрировать потенциал беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) как современного инструмента для создания высокоточных цифровых карт лесосек и последующей оптимизации логистики транспортировки леса.

Методы исследования.

Описание технологических решения по сбору данных с помощью БПЛА, рассмотрение методов обработки полученной информации и

формирования цифровых карт, анализ способов практического применения этих карт для совершенствования транспортной логистики в лесозаготовительном производстве.

Результаты исследования.

В современном лесозаготовительном производстве активно применяются беспилотные летательные аппараты (БПЛА), которые представлены двумя основными типами. Первый тип – мультироторные БПЛА (коптеры с 4, 6 или 8 роторами) (рис. 1).



Рис. 1. БПЛА Мультироторного типа

Они отличаются высокой манёвренностью и способностью зависать на месте, что позволяет выполнять детальную съёмку отдельных участков лесосеки, обследовать труднодоступные зоны и получать снимки под разными углами. Такие аппараты оптимальны для работы на небольших площадях и в условиях сложного рельефа, однако их время полёта ограничено (обычно 20–40 минут), а площадь охвата за один вылет сравнительно невелика [1].

Второй тип – БПЛА фиксированного крыла, конструктивно схожие с самолётами (рис. 2).



Рис. 2. Eclipse – полностью автономный беспилотник – фиксированное крыло

Они способны покрывать значительные территории за один полёт (до нескольких сотен квадратных километров) и обладают большей продолжительностью нахождения в воздухе (2–10 часов и более), что делает их эффективными для картографирования крупных лесосек. Однако для их эксплуатации требуются площадки для взлёта и посадки, а манёвренность в ограниченном пространстве у них ниже, чем у мультироторных систем [2].

Оснащение БПЛА варьируется в зависимости от задач лесозаготовки. Наиболее распространённый вариант – камеры видимого спектра, обеспечивающие съёмку в RGB-диапазоне с высоким пространственным разрешением (до нескольких сантиметров на пиксель). Такие камеры подходят для создания ортофотопланов и визуального анализа состояния лесосеки. Для углублённой оценки состояния леса применяются мультиспектральные камеры, фиксирующие отражённое излучение в нескольких спектральных каналах. Это позволяет выявлять стрессовые состояния деревьев, оценивать биомассу и проводить дифференциацию пород. Наиболее продвинутым оснащением считается LiDAR (Light Detection and Ranging) – лазерный сканер, который формирует точные трёхмерные модели местности даже под пологом леса. LiDAR-системы дают возможность измерять высоту деревьев, определять густоту древостоя, оценивать объёмы древесины и выявлять микрорельеф, что критически важно для планирования лесозаготовки и строительства лесовозных дорог.

БПЛА обладают рядом существенных преимуществ перед традиционными методами картографирования и мониторинга лесосек. Во-первых, они обеспечивают значительно более высокую детализацию данных: разрешение аэрофотосъёмки с БПЛА может достигать 1–5 см/пиксель против 30–31 см/пиксель у спутниковых снимков. Во-вторых,

оперативность получения информации существенно выше – съёмку можно провести в течение нескольких часов после постановки задачи, тогда как заказ и получение спутниковых данных могут занять дни или недели. В-третьих, БПЛА позволяют работать в труднодоступных районах, куда сложно или невозможно добраться наземным транспортом, и выполнять мониторинг выборочных участков без необходимости полного обследования территории. В-четвёртых, экономическая эффективность выше: затраты на один полёт БПЛА существенно ниже стоимости аренды пилотируемой авиации или регулярных спутниковых съёмок. Наконец, регулярность мониторинга с помощью беспилотников можно легко адаптировать под нужды предприятия – проводить обследования еженедельно или даже ежедневно, что невозможно при использовании традиционных методов [3].

Процесс создания цифровых карт лесосек с помощью БПЛА включает несколько последовательных этапов:

1. Сбор данных
2. Обработка данных
3. Точность и верификация цифровых карт

На первом этапе осуществляется планирование полётного задания. Оно начинается с определения границ исследуемой лесосеки на основе имеющихся картографических материалов или данных спутниковой съёмки. Затем на цифровой карте задаются параметры полёта: высота съёмки, перекрытие снимков, направление маршрутов и скорость БПЛА. Учитываются также метеоусловия (скорость ветра, облачность), время суток и ограничения воздушного пространства. С помощью специализированного ПО формируется автоматический маршрут полёта, который загружается в бортовой контроллер БПЛА.

Следующий этап – выполнение аэрофотосъёмки или LiDAR-сканирования. При фотограмметрической съёмке БПЛА движется по заданным маршрутам, делая серии перекрывающихся снимков с заданной частотой. Для LiDAR-сканирования используется лазерный сканер, который излучает импульсы и регистрирует время их возвращения, фиксируя трёхмерные координаты точек на поверхности земли и растительности. В процессе работы оператор контролирует параметры полёта и качество получаемых данных в реальном времени, при необходимости корректируя маршрут или высоту.

Завершающий этап сбора данных – контроль качества. Проверяется полнота покрытия территории снимками или точками LiDAR, отсутствие пропусков и разрывов в данных. Анализируется фактическое перекрытие

снимков, их резкость и равномерность освещения. При выявлении дефектов выполняется повторный облёт проблемных участков.

После сбора данных выполняется их фотограмметрическая обработка, в ходе которой из серии перекрывающихся снимков создаются ортофотопланы (геопривязанные изображения без искажений) и цифровые модели рельефа (ЦМР) и местности (ЦММ). Ортофотоплан даёт точную визуальную картину лесосеки, ЦМР отображает рельеф без растительности, а ЦММ включает все объекты на поверхности, включая деревья.

На следующем шаге строится трёхмерная модель лесосеки. Для этого используются данные LiDAR или результаты фотограмметрической обработки. 3D-модель позволяет детально оценить высоту и густоту древостоя, выявить препятствия на путях транспортировки, проанализировать микрорельеф и спланировать строительство лесовозных дорог.

Затем проводится векторизация объектов — выделение и оцифровка ключевых элементов лесосеки: существующих дорог, просек, делянок, погрузочных площадок, водоёмов и других значимых объектов. Векторные данные структурируются по слоям и атрибутам (ширина дороги, тип покрытия, объём древесины на делянке и т.д.), что необходимо для дальнейшего анализа и планирования [4].

Заключительный этап – проверка точности созданных цифровых карт путём сравнения с наземными измерениями. На ключевых участках лесосеки выполняются контрольные замеры: определяются координаты опорных точек с помощью GNSS-приёмников (точность до 1–2 см), измеряются высоты реперов нивелированием, фиксируются объёмы древесины на тестовых делянках. Полученные данные сопоставляются с соответствующими параметрами на цифровой карте. Рассчитываются погрешности по плановым координатам и высоте, которые обычно не должны превышать 10–15 см для карт, используемых в лесозаготовке. При выявлении значительных расхождений проводится корректировка моделей и повторный контроль. Такая верификация гарантирует достоверность карт и их пригодность для принятия управленческих решений в лесозаготовительном процессе.

Цифровые карты лесосек, созданные с помощью беспилотных летательных аппаратов, сегодня становятся неотъемлемым инструментом оптимизации транспортировки леса — они охватывают весь цикл от первичного анализа территории до оперативного управления логистическими процессами на местах [5].

На этапе анализа лесосеки и дорожной сети такие карты дают исчерпывающую информацию о состоянии инфраструктуры и ресурсах. С их помощью специалисты могут детально оценить проходимость существующих дорог, принимая во внимание такие параметры, как уклон, тип покрытия и несущая способность грунта. Одновременно выявляются препятствия и потенциально опасные участки: поваленные деревья, заболоченные зоны, крутые подъёмы и спуски, оползневые склоны или участки с высоким риском схода селей. Кроме того, на основе трёхмерных моделей древостоя и данных LiDAR выполняется расчёт объёмов древесины на делянках с точностью до 5–7 %, что позволяет грамотно планировать количество рейсов лесовозов и эффективно распределять технику.

Планирование маршрутов лесовозов с использованием цифровых карт опирается на сложные алгоритмы маршрутизации. Они учитывают не только кратчайший путь с учётом рельефа местности, но и экономическую составляющую – минимизацию затрат на топливо и износ техники. При этом система принимает во внимание грузоподъёмность и проходимость конкретного транспорта, а также моделирует транспортные потоки, чтобы избежать заторов на узких участках дорог. Такой подход позволяет выстроить максимально эффективную схему вывоза древесины, адаптированную к реальным условиям лесосеки.

Заключение.

Внедрение беспилотных технологий в лесозаготовке сталкивается с рядом существенных ограничений и вызовов. Погодные условия серьёзно сдерживают регулярность полётов: сильный ветер, снегопад, туман, проливной дождь или низкая облачность делают съёмку невозможной или рискованной. Из-за этого приходится корректировать графики работ с учётом прогнозов погоды. Необходимость квалифицированного персонала также создаёт сложности. Требуются подготовленные операторы БПЛА и специалисты по обработке данных (фотограмметристы, ГИС-аналитики и др.). Их обучение и привлечение увеличивает операционные расходы, особенно для небольших предприятий. Обслуживание техники требует регулярных затрат: нужно калибровать датчики, заменять аккумуляторы, проводить профилактику и ремонт после аварий. В удалённых лесных районах это осложняется слаборазвитой инфраструктурой и трудностями с поставками запчастей. Нормативно-правовые ограничения добавляют административных издержек. Для полётов над лесными массивами необходимо получать разрешения, согласовывать маршруты с органами управления воздушным движением и учитывать зоны запрета (вблизи

аэропортов, военных объектов и т. д.). Процедура оформления может быть длительной, а изменения в законодательстве — требовать постоянной адаптации. Преодоление этих вызовов возможно через поэтапное внедрение решений, партнёрство с профильными организациями и использование проверенных практик. В долгосрочной перспективе это обеспечит устойчивую отдачу от инвестиций в цифровые технологии лесного хозяйства.

Библиографический список

1. RC.COPTER. Мультироторные дроны и БПЛА: все, что нужно знать. URL: <https://rccopter.ru/blogs/knowledge/multirotnye-drony-i-bpla-vse-cto-nuzhno-znat?srsId=AfmBOooML576stpkmBrJ0tiaJPjVjMblUI5p3VJZn1N5GseKvEflEOwK> (дата обращения 23.03.2026).

2. Геоскан пионер документация. Классификация БПЛА по летным характеристикам URL: <https://docs.geoscan.ru/pioneer/database/const-module/classification/classification.html> (дата обращения 24.03.2026).

3. Авдонина А.Е., Чураков А.В. Методологические аспекты и сенсорные архитектуры БПЛА для мониторинга лесных экосистем // Лесное хозяйство в условиях глобальных вызовов: новые парадигмы устойчивого развития. Forestry 2025, 2025. – С. 712-718.

4. Авдонина А.Е, Чураков А.В. Контроль вырубок и борьба с незаконными действиями при помощи беспилотных летательных аппаратов // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах, 2025. – С. 54-58.

5. Primgazeta.ru. Цифровую платформу лесовосток.рф создадут с базой данных со спутников и беспилотников. URL: https://www.primgazeta.ru/news/society/cifrovuyu-platformu-sozdadut-na-bazu-dannyh-sputnikov-i-bespilotnikov-29-08-2019-06-56-45/?sphrase_id=545024 (дата обращения 26.03.2026).

Сведения об авторе

ФИО	Авдонина Александра Евгеньевна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	avdonina10sasha@gmail.com

Аннотация

Статья посвящена применению беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для создания цифровых карт лесосек и оптимизации транспортировки леса. В работе рассмотрены ключевые этапы процесса: планирование полётов, аэрофотосъёмка и LiDAR-сканирование, фотограмметрическая обработка данных, построение 3D-моделей и верификация точности карт. Освещена интеграция полученных данных с ГИС-платформами и системами управления.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты (БПЛА), устойчивость, покрытия, герметизация корпуса, системы, алгоритмы управления.

УДК 629.735.46

Разделы рубрикатора ГРНТИ 73.37.31

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ

Авдони́на А.Е., Коченги́на О.Е., Чурако́в А.В.

Введение.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в последние годы получили широкое распространение в самых разных сферах: от аэрофотосъёмки и мониторинга территорий до доставки грузов и выполнения поисково-спасательных операций. Расширение областей применения БПЛА предъявляет всё более высокие требования к их надёжности и устойчивости в различных условиях эксплуатации, в том числе при неблагоприятных погодных явлениях.

Атмосферные осадки – дождь, снег, град, а также сопутствующее им обледенение – представляют собой один из ключевых факторов, ограничивающих работоспособность БПЛА. Их воздействие может приводить к целому ряду негативных последствий:

1. Увеличению массы аппарата из-за скопления воды или льда;

2. Ухудшению аэродинамических характеристик вследствие изменения формы несущих поверхностей и появления дополнительных сопротивлений;
3. Нарушению работы сенсоров и камер из-за запотевания, загрязнения или обледенения оптических элементов;
4. Коррозии и коротким замыканиям в электронных компонентах из-за проникновения влаги;
5. Снижению эффективности винтов из-за снега или образования ледяной корки;
6. Ошибкам в работе навигационных систем из-за ухудшения сигнала GPS и данных инерциальных датчиков.

В результате даже умеренный дождь или снегопад может привести к преждевременному прерыванию миссии, потере аппарата или повреждению полезной нагрузки. Это особенно критично в таких областях, как экстренное реагирование, сельское хозяйство, инспекция инфраструктуры, где БПЛА должны функционировать в любую погоду.

Цель работы – систематизировать и проанализировать современные методы повышения устойчивости БПЛА к воздействию атмосферных осадков, оценить их эффективность и область применимости.

Методы исследования.

Анализ существующих литературных источников по методам повышения устойчивости беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) к воздействию атмосферных осадков. Систематизация и классификация данных о различных подходах к решению проблемы: конструкционных, технологических и программно-алгоритмических.

Результаты исследования.

Атмосферные осадки – дождь, снег, град, а также сопутствующее им обледенение – оказывают комплексное негативное воздействие на работу беспилотных летательных аппаратов, затрагивая практически все их ключевые системы. Прежде всего, осадки влияют на аэродинамические характеристики и массу аппарата. Скопление воды или снега на несущих поверхностях нарушает обтекаемость корпуса, провоцирует появление дополнительных завихрений и сопротивлений. Увеличение общей массы из-за впитанной влаги или налипшего снега требует большей тяги для поддержания полёта, а неравномерное распределение массы — например, скопление льда на одном крыле – способно вызвать дисбаланс и потерю устойчивости [1]. Силовая установка и винты также подвержены негативному воздействию. Налипание снега, образование ледяной корки или попадание капель воды снижают эффективность винтов, а обледенение

приводит к нарушению их балансировки и вызывает вибрации. В результате моторы испытывают повышенную нагрузку из-за необходимости компенсировать возросшее сопротивление и массу; кроме того, существует риск заклинивания подвижных частей при замерзании влаги в механизмах. Проникновение влаги внутрь корпуса создаёт серьёзные угрозы для электроники и электрических систем: возникает коррозия контактов и проводников, повышается вероятность коротких замыканий на открытых участках схемы, ухудшается изоляция проводов и могут появляться токи утечки. [2] Всё это способно вызвать сбои в работе управляющих элементов и систем управления.

Значительное влияние осадки оказывают и на сенсоры с системами навигации. Запотевание, загрязнение или обледенение оптических элементов камер и лидаров ухудшает качество получаемых изображений, а капли воды на объективах искажают данные визуальных навигационных систем. Слой воды или льда на антеннах ослабляет радиосигналы GPS и связь с пультом управления, а изменения давления и влажности могут провоцировать сбои в работе барометрических датчиков высоты. Вибрации и дисбаланс дополнительно нарушают функционирование инерциальных измерительных модулей. Энергетическая система БПЛА также страдает в условиях осадков. Возросшая нагрузка на моторы и необходимость поддерживать работу дополнительных систем (например, обогрева) ускоряют разряд аккумуляторов, а низкие температуры, характерные для снегопада и обледенения, снижают ёмкость батарей. Коррозия контактов и разрывы аккумуляторов дополнительно усугубляет ситуацию. Проблемы затрагивают и программное обеспечение с управлением: из-за некорректных данных с датчиков возникают ошибки в алгоритмах стабилизации и навигации, а сбои в передаче сигналов приводят к задержкам в реакции аппарата на команды. В критических случаях это может спровоцировать аварийное отключение или принудительный переход в режим «возврата домой» [3].

Наконец, сами конструкционные элементы – корпус и материалы – испытывают негативное воздействие влаги и перепадов температур. Разрушаются защитные покрытия и лакокрасочные слои, корродируют металлические детали, набухают и деформируются композитные материалы при впитывании влаги, а циклы замерзания и оттаивания провоцируют образование микротрещин в пластике. В совокупности эти факторы существенно снижают надёжность, безопасность и эффективность полётов БПЛА, а в ряде случаев могут привести к полной потере аппарата. Понимание механизмов воздействия атмосферных осадков необходимо для

разработки целенаправленных мер защиты и повышения устойчивости беспилотных летательных аппаратов к неблагоприятным погодным условиям.

Для повышения устойчивости беспилотных летательных аппаратов к атмосферным осадкам применяют комплекс конструкционных и технологических решений, направленных на защиту ключевых систем и компонентов. Ключевым подходом является герметизация корпуса и отсеков с электроникой — это предотвращает проникновение влаги внутрь аппарата и снижает риски коротких замыканий и коррозии. Для дополнительной защиты используют влагостойкие материалы и конформные покрытия для электронных компонентов, что повышает надёжность работы бортовой электроники в условиях высокой влажности и сильного ветра [4]. Применение гидрофобных покрытий на внешних поверхностях БПЛА. Такие покрытия отталкивают воду и снег, минимизируют их скопление на крыльях и винтах, а также препятствуют образованию ледяной корки. Это позволяет сохранить аэродинамические характеристики и снизить дополнительную нагрузку на моторы. Дополнительно предусматривают дренажные системы для оперативного отвода попавшей внутрь влаги. Каналы и отверстия, грамотно размещённые в конструкции, позволяют быстро удалять воду, не допуская её скопления и замерзания. Особое внимание уделяют защите энергетической системы. Аккумуляторы размещают в герметичных отсеках с терморегуляцией, чтобы избежать переохлаждения и резкого падения ёмкости при низких температурах. Обогрев батарей и их контактов снижает риск сбоев в энергоснабжении в условиях осадков и мороза. Наконец, для повышения общей надёжности используют резервирование ключевых систем — дублируют датчики, каналы связи и управляющие модули. Это позволяет аппарату сохранять работоспособность даже при частичном выходе из строя отдельных элементов из-за воздействия влаги или обледенения.[5]

Программно-алгоритмические методы дополняют конструкционные и технологические решения, обеспечивая адаптацию БПЛА к изменяющимся условиям полёта в условиях атмосферных осадков. Их ключевое преимущество — гибкость: они не требуют кардинальной перестройки конструкции, но позволяют существенно повысить надёжность и стабильность работы аппарата.

Одним из основных подходов является адаптация полётного контроллера к изменению массы и аэродинамических характеристик. Алгоритмы управления динамически корректируют параметры стабилизации и навигации, компенсируя дополнительные нагрузки из-за скопления воды

или льда, а также изменения сопротивления воздуха. Это помогает сохранить устойчивость и управляемость даже при частичном нарушении аэродинамики.

Для предотвращения попадания в зоны интенсивных осадков применяются системы интеграции с метеоданными. БПЛА могут использовать информацию от наземных метеостанций, радаров и спутниковых сервисов для:

1. Оценки текущей и прогнозной погоды по маршруту;
2. Выявления зон с высокой вероятностью дождя, снега или града;
3. Автоматической корректировки маршрута с обходом опасных участков;
4. Своевременного принятия решения о возврате на базу при ухудшении условий.

Наиболее высокая устойчивость достигается при системном подходе: сочетание физической защиты с интеллектуальным управлением и метеомониторингом позволяет эксплуатировать БПЛА в сложных погодных условиях с минимальным риском отказов.

В ходе исследования систематизированы и проанализированы методы повышения устойчивости БПЛА к атмосферным осадкам (дождю, снегу, граду, обледенению) – конструкционные, технологические и программно-алгоритмические, а также оценена их эффективность.

Установлено, что максимальной защиты можно достичь только за счёт комплексного применения разных подходов. Конструкционные решения (герметизация корпуса, гидрофобные покрытия, оптимизация аэродинамической формы) минимизируют проникновение влаги и скопление осадков. Технологические меры (системы обогрева, дренаж, терморегуляция аккумуляторов) расширяют диапазон рабочих условий, особенно при низких температурах. Программно-алгоритмические методы (адаптация полётного контроллера, интеграция с метеоданными, резервирование систем управления, алгоритмы самодиагностики) обеспечивают гибкую адаптацию к меняющимся условиям и позволяют предотвращать отказы на ранних стадиях.

Ключевой вывод: ни один отдельный метод не даёт полной защиты – необходима их комбинация с учётом класса и назначения БПЛА. Для микро- и малых аппаратов приоритет – легкие и энергоэффективные решения (герметизация, программная адаптация), для средних и тяжелых – комплексное внедрение обогрева, дренажа и резервирования. При этом внедрение защитных мер увеличивает массу и энергопотребление, усложняет конструкцию и повышает стоимость.

Заключение.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой лёгких энергоэффективных систем обогрева, совершенствованием гидрофобных покрытий, созданием более точных алгоритмов прогнозирования отказов, оптимизацией управления для аппаратов с изменяемой аэродинамической конфигурацией и изучением возможностей применения наноматериалов и композитов.

Таким образом, сочетание физической защиты, технологических инноваций и интеллектуального управления позволяет существенно расширить возможности эксплуатации БПЛА в сложных метеорологических условиях, повышая их надёжность и универсальность.

Библиографический список

1. *Кириченко М.В., Касымканова Х.М.* Влияние метеорологических условий съёмки на точность моделей беспилотных летательных аппаратов // Молодой ученый, 2024. – № 48.1 (547.1). – С. 27-29.
2. Обледенение БПЛА: как распознать и что делать. URL: <https://dzen.ru/a/Z1xWoH0S5yJhvU9J> (дата обращения 10.03.2026).
3. *Кузнецов И.Е., Мельников А.В., Rogozin Е.А., Страшко О.В.* Методика учета влияния метеорологических факторов на эффективность применения беспилотных летательных аппаратов на основе системного анализа // Вестник Дагестанского государственного технического университета, 2018. – №2, том 45.
4. *Горбунов А.А., Галимов А.Ф.* Влияние метеорологических факторов на применение и безопасность полета беспилотных летательных аппаратов с бортовым ретранслятором радиосигнала // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, 2016. – С.7-15.
5. *Архипов А.В., Тимошенков С.П.* Применение адаптивных регуляторов в системах управления беспилотными летательными аппаратами // Известия вузов. Электроника, 2022. – №27(5). – С.652-663.

Сведения об авторах

ФИО	Авдони́на Александра Евге́ньевна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	avdonina10sasha@gmail.com

ФИО	Коченгина Оксана Евгеньевна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	oksana.kuz5@mail.ru

ФИО	Чураков Андрей Владимирович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	9526-9599
e-mail	sheff_2.01@mail.ru

Аннотация

Статья посвящена комплексному исследованию методов повышения устойчивости беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) к воздействию атмосферных осадков. В работе проанализировано влияние осадков на работу БПЛА: рассмотрены физические механизмы негативного воздействия и типичные отказы систем. Систематизированы и классифицированы основные подходы к повышению устойчивости: конструкционные, технологические и программно-алгоритмические

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, устойчивость, осадки, покрытия, герметизация корпуса, системы, адаптация, алгоритмы управления.

УДК 629.735.46

Разделы рубрикатора ГРНТИ 73.37.31

ВНЕДРЕНИЕ В ПРОИЗВОДСТВО УСТАНОВОК АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОМОНТАЖА

Дробко П.Д., Теппоев А.В.

Введение.

Актуальность темы обусловлена высокими требованиями к качеству и надёжности продукции, работающей в электрических схемах изделий различного назначения. Такие изделия используются в авиации, космической отрасли, железнодорожном транспорте, ВПК и других ответственных сегментах различных отраслей. Соответственно цена ошибки является очень высокой.

Недостатки при контроле типовых методов контроля, включающих проверку схемы электрической принципиальной изделия и контроля сопротивления изоляции цепей в соответствии с требованиями документации на изделия, хорошо заметны начиная уже с мелкосерийного производства так как контроль выполняют люди. Объём контроля в виду специфики кратно возрастает, а время достаточно ограничено также нужно помнить о том, что кроме проверок электрических параметров так же необходимы и другие виды пооперационного контроля, такие как проверка геометрии и соответствия электромонтажа различным стандартам (например, ГОСТ 23587-96 [1]). Вследствие чего возникает большая вероятность ошибки как в процессе производства, так и при приёмочном контроле, вызванной человеческим фактором.

Целью внедрения автоматизированных систем контроля электромонтажа является повышение производительности контроля и исключение ошибок, связанных с человеческим фактором, как следствие на этапе изготовления изделий выявляется подавляющее большинство допущенных дефектов электромонтажа, что обеспечивает стабильные показатели качества продукции.

Цель работы – анализ используемых методов и технологий контроля, выбор предпочтительной автоматизированной установки контроля, оценка эффекта от её внедрения и эксплуатации.

Методика исследования.

В нашем примере рассматриваются такие объекты контроля как изделия, выполненные с применением пайки, не имеющие в своей схеме активных радиоэлементов, но обладающие большим количеством цепей. Например, жгуты электрические и коммутационные коробки с разъёмами присоединительными типа ШР, РС, РМ, РПМ, РП и др. Также мы не будем рассматривать операции контроля, связанные с механическими испытаниям (например, вибропрочность согласно ГОСТ 30631-99 [2]), проверкой геометрических размеров и проверкой правильности монтажа (например, правильность разделки согласно ОСТ4 Г0.010.016 [3]).

Результаты исследования.

Рассмотрим типовые требования такие как проверка на соответствие схемы электрической принципиальной и контроля сопротивления изоляции токоведущих цепей относительно корпусов соединителей и между любыми электрически разобщённым цепями.

Проверка изделия на соответствие схемы электрической принципиальной происходит следующим образом: аттестованным мультиметром в режиме проверки целостности цепи, проверяют отсутствие обрывов или замыканий на каждой цепи жгута, согласно схеме.

Проверка сопротивления изоляции токоведущих цепей относительно корпусов соединителей и между любыми электрически разобщённым цепями производится с помощью аттестованного мегомметра с определённой допустимой погрешностью. Испытательное напряжение и минимальное допустимое сопротивление изоляции должны соответствовать техническим требованиям на изделие (типовое значение при нормальных климатических условиях: сопротивление не менее 50 МОм при подаче постоянного напряжения 250 В, в течение 1 минуты).

Обе операции в зависимости от объекта контроля могут быть очень трудоёмкими и времязатратными. Данные операции требуют от контролёра большого терпения, концентрации внимания и старательности, что сказывается на утомляемости и, как следствие ведёт к пропуску дефектов и неправильной трактовке значений измерительных приборов. [4].

Системы автоматизированного контроля радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) являются результатом естественного развития в области автоматизации радиоизмерений. Данные системы позволяют достичь практически полной автоматизации процессов контроля электромонтажа и

поиска неисправностей, что приводит к значительному сокращению времени проверки и уменьшению количества задействованного персонала. Параллельно повышается достоверность и объективность контроля, а также обеспечивается накопление структурированной информации для последующего статистического анализа дефектов.

В рамках нашей работы мы будем рассматривать автоматизацию процесса на примере установки ЛИАНА Р100Е, как наиболее подходящее под наши требования и наиболее бюджетное решение.

Установка позволяет проверить соответствие объекта контроля его электрической схеме – выявить обрывы, замыкания, лишние связи, а также подать испытательное напряжение в заданные точки контролируемого объекта с целью определения качества изоляции (сопротивления и электрической прочности). Также установка производит контроль параметров электрорадиоэлементов:

- сопротивления для резистивных элементов;
- правильность установки диодов.

Конструкция установки: коммутации, контроля и формирования испытательных напряжений (рис. 1) размещены в основной стойке коммутации, система управления и ввода-вывода информации (пульт управления) расположены на столе. Стойка коммутации изготовлена в стандарте «Евромеханика-19», имеет в плане габариты 600×600 мм и высоту 1500 мм. Подвижные опорные шарниры стойки позволяют перемещать ее на небольшие расстояния по ровной поверхности.

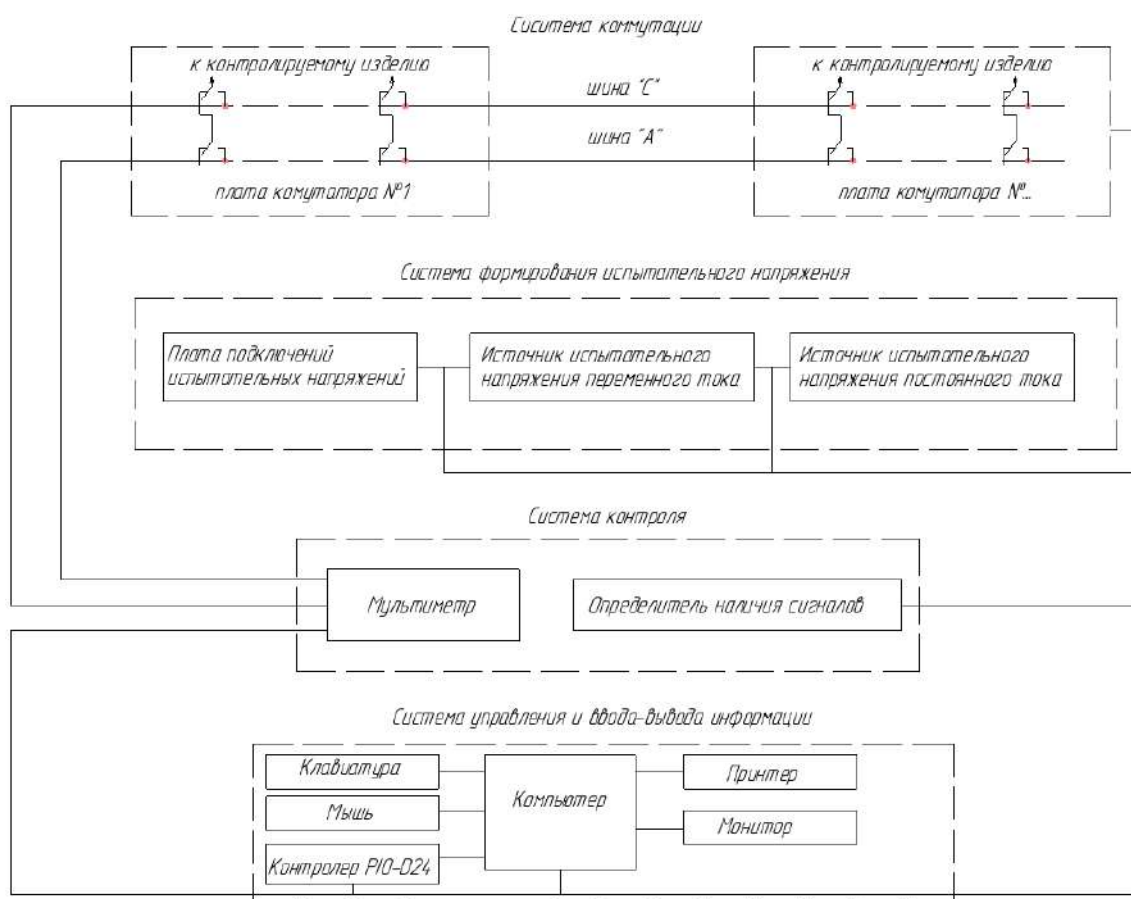


Рис. 1. Функциональная схема

Перед приобретением оборудования необходимо определить номенклатуру изделий, подлежащих контролю, и технические требования к ним. На основе этих данных составляется техническое задание для заказа установки, поскольку существует возможность её дооснащения под требования заказчика в зависимости от специфики продукции (например, установка специализированных разъемов для подключения к блоку коммутации). Для подключения проверяемого изделия к полю разъемов установки необходимо разработать технологическую оснастку в виде жгутов. Технологические жгуты, по сути, являются удлинителями, совмещающими функцию переходников в случае необходимости, схема жгутов допускается любая, но для упрощения составления программы контроля изделия желательно выполнять соединения разъемов последовательно начиная с первого контакта. Длина таких жгутов не должна превышать двух метров. После поставки установки на производство и оборудования рабочего места, необходимо подобрать персонал для прохождения обучения, тут стоит отметить, что у сотрудника уже должны быть сформированы необходимые компетенции (техническое образование в сфере электротехники, допуск по электробезопасности, уверенный

пользователь ПК). После, первичной аттестации установки можно приступать к эксплуатации. Подключение контролируемого изделия к установке через технологические жгуты представлено на рис. 2.

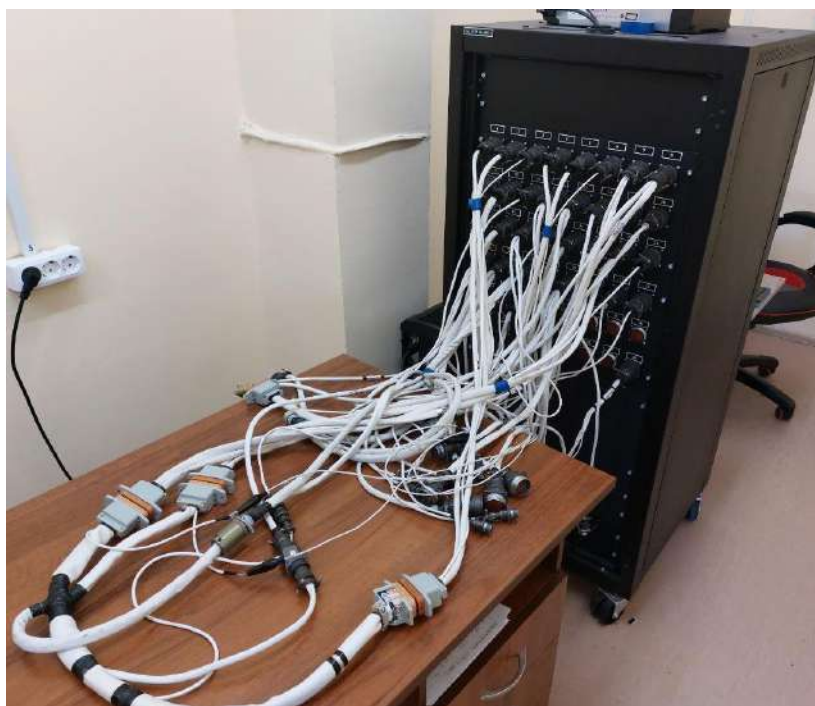


Рис. 2. Подключение контролируемого изделия к установке через технологические жгуты

После запуска установки и подключения объекта контроля необходимо открыть программную оболочку и создать задание для контроля (программа контроля).

Задание для контроля может быть создано автоматически, составлением программы по эталону проверяемого объекта (то есть подключается проверенный жгут и запускается функция сканирования на предмет поиска цепей) или описанием схемы и алгоритма функционирования объекта (программа пишется вручную, с указанием точек контроля, в соответствии со схемой). Далее выполняется трансляция программы на коммутационный блок и происходит запуск автоматической проверки объекта контроля (происходит проверка участвующих в схеме цепей), в случае выявления отклонений от заданных параметров (дефектов) оператор будет оповещён, также по окончании процесса проверки на устройства вывода поступит текст протокола испытаний в котором будут содержаться различные данные (децимальные и заводские номера изделий, параметры контроля, сведения об операторе) в том числе те, которые позволяют точно локализовать место дефекта [2].

Выводы.

Автоматизированные системы контроля РЭА на производстве обеспечивают ряд значительных преимуществ по сравнению с ручной проверкой:

- Повышение точности и качество контроля. Минимизация человеческого фактора снижает риск пропуска дефектов, способных привести к выходу из строя конечной продукции. Практическая работа показала, что из партии жгутов (623 шт., разных типов) поступивших на входной контроль с другого предприятия где они были приняты ОТК, выявлено 5 изделий, имеющих дефекты в части электромонтажа, а именно: 3 шт.- сопротивление изоляции не соответствует требованиям КД, 2 шт.- замыкания цепей.
- Значительно сокращается скорость проверки изделий, что важно с учётом требований на современных производствах. При проверке соответствия электрической схеме и сопротивления изоляции, изделия жгут состоящее из разъёмов: 2РМДТ24КПН10Ш5В1В (1шт), 2РМДТ30БПН24Г5В1В (1шт) РПМ12М-66Ш1Л-В (3 шт), РС50 БТВ (1 шт), и трёх точек заземления (суммарно 285 точек контроля), время проверки сокращается с ≈ 300 минут до ≈ 10 минут (включая подключение изделия к переходным жгутам) [5-7].
- Автоматизация документооборота за счёт фиксации результатов в цифровом виде.
- Гибкость и адаптивность - быстрая перенастройка под новые типы изделий.
- Снижение трудозатрат. Рост производительности естественным образом уменьшает потребность в персонале для выполнения рутинных операций.

В этой работе мы прошли полный путь: от анализа проблемы ручного контроля электромонтажа до выбора, внедрения и оценки реальной автоматизированной установки контроля электромонтажа «ЛИАНА Р100Е».

Автоматизированные системы контроля значительно повышают надежность и безотказность продукции, сокращают издержки и ускоряют производство, что особенно важно в отраслях с высокими требованиями к качеству [8].

При этом автоматизация контроля не может компенсировать скрытые технологические дефекты. Следовательно, автоматизированный контроль выступает не как замена, а как критически важное дополнение к общей системе обеспечения качества, берущее на себя рутинные, но требовательные к точности операции и высвобождающее персонал для решения более сложных задач.

Библиографический список

1. ГОСТ 23586-96 Монтаж электрический радиоэлектронной аппаратуры и приборов. Технические требования к жгутам и их креплению. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200017804> (дата обращения 08.04.2026).
2. ГОСТ 30631-99 Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам при эксплуатации. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200008493> (дата обращения 08.04.2026).
3. ОСТ4 Г0.010.016 Электромонтаж кабельных изделий в соединители. Общие технические требования. URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4293752/4293752373.htm> (дата обращения 08.04.2026).
4. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 Менеджмент риска. Методы оценки риска ISO/IEC 31010:2009. Издание официальное. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200090083> (дата обращения 08.04.2026).
5. ГОСТ 3345-76 Кабели, провода и шнуры. Метод определения электрического сопротивления изоляции. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004610> (дата обращения 08.04.2026).
6. ГОСТ 20.57.406-81 Комплексная система контроля качества изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические методы испытаний. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200016473> (дата обращения 08.04.2026).
7. ГОСТ 23585-79 Монтаж электрический радиоэлектронной аппаратуры и приборов технические требования к разделке и соединению экранов проводов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200016041> (дата обращения 08.04.2026).
8. Байда Н.П., Разин В.М., Капицкий Я.И., Павленко Г.П., Танасейчук В.М. Системы автоматического контроля радиоэлектронной аппаратуры // Известия Томского ордена Октябрьской революции и Ордена трудового Красного знамени политехнического института имени С.М. Кирова, 1972. – Т. 230. – С. 60-63.

Сведения об авторах

ФИО	Теппоев Алексей Викторович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	4451-4059
e-mail	avt01@inbox.ru
ФИО	Дробко Петр Дмитриевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	peter0178d@gmail.com

Аннотация

Внедрение автоматизированных испытательных установок, предназначенных для комплексной проверки изделий, выполненных с помощью электромонтажа. Установка позволяет исключить субъективность и автоматизировать процесс проверки в части сопротивления изоляции и правильности электромонтажа.

Ключевые слова: испытания, автоматизированный контроль, повышение качества проверки.

УДК 630*848

ГРНТИ 55.01.81

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕСТИЦИЙ В ГЛУБОКУЮ
ПЕРЕРАБОТКУ ДРЕВЕСИНЫ НА БАЗЕ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫХ**

ПАРКОВ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

Кокорева С. В., Егорушкова З. И.

Введение.

Лесопромышленный комплекс России сталкивается с системной проблемой низкой доли глубокой переработки древесины и, как следствие, высокой долей экспорта круглого леса и необработанных пиломатериалов. По данным Федеральной таможенной службы, в 2020–2023 гг. доля круглого леса в структуре экспорта сохранялась на уровне 15–20%, при этом добавленная стоимость при экспорте необработанной древесины в 3–5 раз ниже, чем при экспорте продуктов глубокой переработки (целлюлоза, фанера, CLT-панели, пеллеты). Введение экспортных пошлин на круглый лес (с 2022 года) и санкционные ограничения, закрывшие европейский рынок для традиционных поставок пиломатериалов, создали ситуацию «вынужденного импортозамещения». Одновременно произошла переориентация экспортных потоков на восток – в Китай, страны Юго-Восточной Азии и на внутренний рынок. В этих условиях пересмотр критериев эффективности инвестиционных проектов в ЛПК становится необходимым условием развития отрасли.

Особую роль в стратегии глубокой переработки играют лесопромышленные парки – территориально-производственные кластеры, объединяющие лесозаготовительные, перерабатывающие и логистические мощности. В мировой практике (Финляндия, Швеция, Канада) такие парки доказали свою эффективность, позволяя снизить транспортные издержки, утилизировать отходы и повысить общую добавленную стоимость. В России пилотные проекты лесопромышленных парков реализуются в Архангельской, Вологодской, Кировской областях и Красноярском крае, однако системная методика оценки их инвестиционной привлекательности отсутствует.

Данная работа посвящена сравнительной оценке двух наиболее перспективных моделей глубокой переработки в составе лесопромышленного парка: производство топливных гранул (пеллет) и производство CLT-панелей (перекрёстно-клеёной древесины).

Цель работы – разработать методический подход к оценке эффективности инвестиционных проектов глубокой переработки древесины на базе лесопромышленных парков и провести сравнительный анализ двух моделей импортозамещения: производство топливных гранул

(pellet) и производство CLT-панелей. Для достижения цели решались следующие задачи:

- проанализировать текущую структуру экспорта и внутреннего потребления древесины, выявив основные барьеры для развития глубокой переработки;
- разработать методику инвестиционной оценки проектов с учётом отраслевых предпочтений (лесная амнистия, льготное кредитование, меры государственной поддержки);
- выполнить расчёт ключевых показателей эффективности (NPV, IRR, срок окупаемости) для двух моделей в базовом, оптимистичном и пессимистичном сценариях;
- провести анализ чувствительности к изменению ключевых факторов (ставка дисконта, цена продукции, стоимость сырья);
- обосновать рекомендации по выбору приоритетной модели в зависимости от инвестиционного горизонта и стратегических целей.

Методы исследования.

В работе использован комплекс методов инвестиционного и стратегического анализа. Основой послужил метод дисконтирования денежных потоков (Discounted Cash Flow, DCF), позволяющий оценить чистую приведённую стоимость (NPV), внутреннюю норму доходности (IRR) и дисконтированный срок окупаемости (DPP) [1]. Расчёты выполнялись на горизонте 10 лет с шагом 1 год.

Ставка дисконтирования принята на уровне 15% годовых, что соответствует средневзвешенной стоимости капитала (WACC) для лесопромышленных проектов в текущих макроэкономических условиях с учётом премии за отраслевые и страновые риски [2].

Применён метод сценарного моделирования, включающий три сценария: базовый – умеренный рост цен на продукцию (3% в год), стабильная стоимость сырья, плановая загрузка мощностей 85%; оптимистичный – ускоренный рост цен (5% в год), снижение стоимости сырья за счёт эффекта масштаба, загрузка мощностей 95%, получение льготного кредита под 8% годовых; пессимистичный – стагнация цен (0% рост), повышение стоимости сырья (5% в год), загрузка мощностей 70%, ставка кредитования 18% [3].

Для учёта мер государственной поддержки в расчёты включены следующие преференции: льготное кредитование в рамках постановления Правительства РФ № 1912 (ставка 5–8% против рыночных 15–17%), возможность применения «лесной амнистии» (снижение затрат на оформление лесных участков на 30–50%), субсидирование логистических

затрат при экспорте на восточном направлении (до 20% транспортных расходов) [4].

Бенчмаркинг выполнен на основе данных по реализованным проектам в Архангельской области (ЛПК «Устьянский», проект по пеллетам) и в Калужской области (завод CLT-панелей «CLT-Профиль») [5, 6].

Результаты исследования.

По данным Рослесинфорга за 2023 год, структура использования древесины в России выглядит следующим образом: 35% – круглый лес (экспорт и внутренняя переработка низких переделов), 28% – пиломатериалы, 15% – фанера и плиты, 12% – целлюлозно-бумажная продукция, 10% – топливные гранулы и прочие продукты глубокой переработки. При этом добавленная стоимость в расчёте на 1 м³ древесины составляет: для круглого леса – 1,5–2 тыс. руб., для пиломатериалов – 4–6 тыс. руб., для пеллет – 8–12 тыс. руб., для CLT-панелей – 25–40 тыс. руб.

Основным барьером для развития глубокой переработки остаются: высокая капиталоемкость (строительство завода CLT-панелей требует 2–3 млрд руб.), дефицит квалифицированных кадров, удалённость от рынков сбыта и высокая стоимость заёмного капитала.

В табл. 1 представлены основные параметры двух рассматриваемых моделей.

Для количественной оценки инвестиционной привлекательности двух моделей глубокой переработки древесины — производства топливных гранул (пеллет) и производства CLT-панелей — использованы стандартные показатели эффективности инвестиционных проектов: чистая приведённая стоимость (NPV), внутренняя норма доходности (IRR), простой и дисконтированный сроки окупаемости (PP, DPP). Расчёты выполнены на горизонте 10 лет с шагом 1 год. Ставка дисконтирования принята на уровне 15% годовых, что соответствует средневзвешенной стоимости капитала (WACC) для лесопромышленных проектов в текущих макроэкономических условиях.

Чистая приведённая стоимость определена по формуле:

$$NPV = \sum_{t=1}^{10} \frac{CF_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (1)$$

где CF_t – денежный поток от операционной деятельности в году t ; $r = 0,15$; I_0 – начальные инвестиции.

Табл. 1. Сравнительная характеристика проектов глубокой переработки древесины

Параметр	Производство пеллет	Производство CLT-панелей
Капитальные затраты, млн руб.	350–500	2 200–3 000
Годовая мощность, тыс. м³/год	50–80 (в пересчёте на щепу)	30–50 (панелей)
Численность персонала, чел.	40–60	120–180
Себестоимость продукции, тыс. руб./т (пеллеты) / тыс. руб./м³ (CLT)	6–8	25–35
Средняя цена реализации, тыс. руб./т (пеллеты) / тыс. руб./м³ (CLT)	10–14	45–65
Валовая маржа, %	30–40	35–45

Денежный поток CF_t рассчитывался как:

(2)

$$CF_t = (R_t - VC_t - FC_t - A_t) \times (1 - T) + A_t$$

где R_t – выручка; VC_t – переменные затраты; FC_t – постоянные затраты (без амортизации); A_t – амортизационные отчисления; $T = 0,2$ – ставка налога на прибыль.

Для пеллетного проекта в первый год эксплуатации (загрузка 85% мощности, выпуск 51 тыс. т) выручка составила 561 млн руб., переменные затраты – 331,5 млн руб., постоянные затраты — 45 млн руб., амортизация – 42 млн руб. Налогооблагаемая прибыль: 142,5 млн руб., налог – 28,5 млн руб., чистая операционная прибыль – 114 млн руб. С учётом амортизации $CF_1 = 156$ млн руб. Аналогично рассчитаны потоки для последующих лет с учётом роста цен и затрат.

Для CLT-проекта (загрузка 85%, выпуск 34 тыс. м³) выручка в первый год – 1 870 млн руб., переменные затраты – 1 088 млн руб., постоянные затраты – 220 млн руб., амортизация – 260 млн руб. Прибыль до налога – 302 млн руб., налог – 60,4 млн руб., чистая прибыль – 241,6 млн руб., $CF_1 = 501,6$ млн руб.

В табл. 2 представлены итоговые показатели эффективности для обоих проектов в базовом сценарии, а также результаты сценарного анализа

(оптимистичный и пессимистичный сценарии) и оценки влияния мер государственной поддержки.

Как видно из таблицы, производство пеллет характеризуется более высокой внутренней нормой доходности (28% против 21%) и значительно более быстрой окупаемостью, что делает его предпочтительным с точки зрения возврата инвестиций. Однако CLT-проект генерирует больший абсолютный NPV (1 250 млн. руб.) и при наличии льготного кредитования становится сопоставим по эффективности.

Табл. 2. Показатели эффективности проектов и результаты сценарного анализа

Показатель	Производство пеллет	Производство CLT-панелей
Инвестиции, млн руб.	420	2 600
NPV за 10 лет (базовый), млн руб.	380	1 250
IRR, %	28	21
Простой срок окупаемости, лет	3,8	6,5
Дисконтированный срок окупаемости, лет	4,2	7,8
NPV оптимистичный, млн руб.	620	2 100
NPV пессимистичный, млн руб.	120	380
NPV при льготном кредите (ставка 8%), млн руб.	510	1 980
Срок окупаемости с господдержкой, лет	3,5	5,4

Заключение.

Проведённое исследование позволило количественно оценить инвестиционную эффективность двух моделей глубокой переработки древесины в составе лесопромышленных парков. Производство топливных гранул (пеллет) характеризуется более низким порогом входа (капитальные затраты 350–500 млн руб.), быстрой окупаемостью (4,2 года по дисконтированному потоку) и высокой устойчивостью к негативным изменениям рыночной конъюнктуры. Этот проект может быть

рекомендован как «стартовый» для лесопромышленных парков, обеспечивающий быстрый возврат инвестиций и создание денежного потока для последующего развития. В свою очередь, производство CLT-панелей требует значительно больших капитальных вложений (2,2–3,0 млрд руб.) и имеет более длительный срок окупаемости (7–8 лет), однако обеспечивает на порядок более высокую добавленную стоимость и создаёт продукт, полностью замещающий импортные аналоги в сегменте многоэтажного деревянного домостроения. При наличии мер государственной поддержки (льготное кредитование, субсидирование) этот проект становится экономически привлекательным и стратегически значимым.

Сценарный анализ показал, что в условиях высокой неопределённости (пессимистичный сценарий) проект по производству пеллет сохраняет положительный NPV (120 млн руб.), тогда как проект по CLT-панелям оказывается на грани рентабельности (NPV 380 млн руб. при инвестициях 2,6 млрд руб.). Таким образом, для лесопромышленных парков целесообразна двухэтапная стратегия: на начальном этапе – запуск производства пеллет для быстрого возврата инвестиций, на стратегическом – создание мощностей по выпуску CLT-панелей с привлечением государственной поддержки и ориентацией на внутренний рынок и экспорт в страны АТР.

Библиографический список

1. Брейли Р., Майерс С. Принципы корпоративных финансов. – Москва: Олимп-Бизнес, 2019. – 1008 с.
2. Оценка инвестиционных проектов в лесном секторе : методические рекомендации / под ред. В. В. Седова. – Москва: ВНИИЛМ, 2021. – 156 с.
3. Шапиро В.Д. Управление проектами. – М. : Кнорус, 2022. – 288 с.
4. Постановление Правительства РФ от 09.12.2022 № 1912 «О мерах государственной поддержки инвестиционных проектов в лесопромышленном комплексе». – Доступ из СПС «КонсультантПлюс».
5. Годовой отчёт ЛПК «Устьянский» за 2023 год. – Устьянск, 2024. – 98 с.
6. Аналитический обзор рынка CLT-панелей в России / Ассоциация деревянного домостроения, 2023. – 45 с.

Сведения об авторах

ФИО	Егорушкова Зоя Игоревна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	egorushkova.zoya@yandex.ru

ФИО	Кокорева Софья Валерьевна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	sofi.kokoreva1313@gmail.com

Аннотация

В статье рассмотрены подходы к оценке экономической эффективности инвестиционных проектов в сфере глубокой переработки древесины в условиях санкционных ограничений и переориентации экспорта. Цель работы – разработка методического подхода к сравнению двух моделей импортозамещения: производство топливных гранул (pellet) и производство CLT-панелей (перекрёстно-клеёной древесины). Исследование базируется на методах инвестиционного анализа (NPV, IRR, срок окупаемости), сценарном моделировании и бенчмаркинге. Установлено, что модель производства топливных гранул характеризуется более быстрой окупаемостью (4,2 года) и устойчивостью к колебаниям рыночной конъюнктуры, тогда как производство CLT-панелей обеспечивает более высокую добавленную стоимость, но требует значительных капитальных вложений и имеет более длительный срок окупаемости (7–9 лет). Обоснована целесообразность поэтапного развития лесопромышленных парков: на начальном этапе – производство пеллет для быстрого возврата инвестиций, на стратегическом – создание мощностей по выпуску CLT-панелей как основы для импортозамещения в домостроении.

Ключевые слова: лесопромышленный комплекс, глубокая переработка древесины, инвестиционная эффективность, NPV, IRR,

пеллеты, CLT-панели, импортозамещение, лесопромышленный парк, сценарное моделирование.

УДК 630*6:330.322

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.45.01

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ЛИНИЯМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Коченгина О.Е., Куттеева М.А., Чураков А.В.

Введение.

Современный этап развития промышленности характеризуется глубокой интеграцией информационных технологий и физических процессов. Одним из ключевых трендов является переход от частичной автоматизации отдельных операций к комплексной автоматизации всего производственного цикла. В этих условиях традиционные методы мониторинга, основанные на периодическом контроле со стороны человека, и жесткие системы управления на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК) перестают отвечать требованиям гибкости и адаптивности. Роботизированные комплексы (РК) выступают не просто как исполнительные механизмы, заменяющие мускульный труд, а как полноценные элементы киберфизической системы.

Цель работы – анализ методов и разработка концептуальных подходов к построению систем автоматизированного мониторинга и управления производственными линиями на базе роботизированных комплексов.

Методы исследования.

Анализ литературных источников по автоматизации производств и робототехнике. Систематизация и классификация типов роботизированных комплексов и архитектур систем управления. Применение теории расписаний для координации работы нескольких роботов.

Результаты исследования.

Традиционные производственные линии часто представляют собой набор автономных станков и конвейеров, объединенных жесткой логикой работы. Мониторинг в таких системах, как правило, является пассивным: сбор данных происходит с задержкой, а анализ выполняется диспетчером.

Это порождает ряд существенных ограничений [1]. Во-первых, наблюдается высокое время реакции на нештатные ситуации, поскольку обнаружение поломки или брака происходит постфактум, что ведет к выпуску больших объемов некондиционной продукции. Во-вторых, существует сложность переналадки, так как переход на выпуск новой номенклатуры изделий требует значительных временных затрат на перенастройку оборудования и перепрограммирование контроллеров. В-третьих, человеческий фактор остается одной из основных причин аварий и сбоев, поскольку ошибки операторов при интерпретации данных мониторинга или при управлении процессами продолжают оказывать существенное негативное влияние. Внедрение роботизированных комплексов частично решает проблему исполнительской дисциплины, но создает новые вызовы, связанные с интеграцией разнородного оборудования и необходимостью синхронизации потоков данных.

Роботизированный комплекс в современном понимании – это совокупность промышленного робота (или нескольких роботов), технологического оборудования, захватных устройств и системы технического зрения, объединенных единой системой управления [2]. В контексте производственной линии РК выполняют три ключевые функции. Транспортно-загрузочная функция заключается в обслуживании станков и перемещении заготовок между позициями обработки. Технологическая функция представляет собой непосредственное выполнение операций, таких как сварка, покраска или сборка. Контрольно-измерительная функция обеспечивает автоматическую проверку качества готовых деталей с использованием машинного зрения. Включение РК в производственную линию позволяет перейти от жесткой автоматизации к гибкой. Например, вместо специализированного конвейера, рассчитанного на одну деталь, используется мобильный робот или манипулятор, траектория движения которого меняется программно в зависимости от производственного задания.

Для эффективного управления роботизированной линией необходима многоуровневая архитектура, объединяющая потоки данных от физических устройств до уровня принятия решений. Предлагаемая архитектура включает три основных уровня. Полевой уровень представляет собой совокупность физических устройств – датчиков положения, усилия и температуры, промышленных роботов, станков с ЧПУ, конвейеров, причем данные с этого уровня поступают в реальном времени. Уровень контроля и управления включает программируемые логические контроллеры и промышленные компьютеры, реализующие логику безопасности и

локального управления, а также SCADA-системы, обеспечивающие визуализацию процесса, сигнализацию отклонений и краткосрочное архивирование данных. Уровень производственной логистики и оптимизации представляет собой систему управления производственными процессами (MES), где осуществляется планирование заданий для роботов, анализ эффективности использования оборудования, прогнозирование износа инструмента на основе накопленных данных [3]. Ключевым элементом связи между вторым и третьим уровнями является цифровой двойник производственной линии – виртуальная модель, которая в реальном времени синхронизирована с физическим процессом.

Основной научно-технической задачей является разработка алгоритмов, позволяющих роботизированному комплексу адаптироваться к изменяющимся условиям производственной среды. В области мониторинга в реальном времени современные роботизированные комплексы оснащаются множеством встроенных сенсоров: датчиками тока, вибродатчиками, тепловизорами. Анализ этих данных позволяет перейти от планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию по фактическому состоянию. Например, рост тока в приводе схвата может сигнализировать об износе пневмоцилиндра или перекосе заготовки, а анализ вибраций подшипников позволяет прогнозировать момент достижения предельного состояния. В сфере адаптивного управления траекториями использование технического зрения позволяет отказаться от жесткого позиционирования деталей. Алгоритмы обработки изображений определяют координаты объекта с субмиллиметровой точностью и передают их роботу, который корректирует траекторию в реальном времени, что особенно важно при сборочных операциях с минимальными допусками и при смещении деталей на конвейере.

Что касается координации нескольких роботов, в условиях общей рабочей зоны возникает проблема конфликтов. Система управления верхнего уровня распределяет задачи между манипуляторами, применяя методы диспетчеризации на основе теории расписаний для минимизации простоев и исключения столкновений. Имитационное моделирование позволяет проверять алгоритмы координации, оценивать загрузку оборудования и время цикла, а также разрабатывать протоколы безопасного взаимодействия роботов.

Экономический эффект от внедрения описанных подходов складывается из нескольких факторов. Наблюдается снижение простоев, поскольку переход на прогнозную аналитику позволяет сократить внеплановые остановки линии на 30...50 процентов [4]. Происходит

повышение качества благодаря тому, что автоматизированный контроль на каждом этапе снижает процент брака. Отмечается рост производительности за счет оптимизации загрузки оборудования и возможности круглосуточной работы в безлюдном режиме на финальных стадиях автоматизации. Перспективным направлением дальнейших исследований является применение технологий искусственного интеллекта, в частности, глубокого обучения, для анализа видеопотоков с камер технического зрения с целью выявления скрытых дефектов, а также использование алгоритмов машинного обучения для оптимизации параметров работы роботов в режиме реального времени. Кроме того, важным направлением развития является стандартизация протоколов обмена данными между разнородными роботизированными комплексами различных производителей, что позволит создавать действительно интегрированные производственные линии без привязки к одному вендору оборудования.

Заключение.

Подводя итог следует отметить, что автоматизация процессов мониторинга и управления производственными линиями с использованием роботизированных комплексов представляет собой сложную многокомпонентную задачу, требующую системного подхода. Интеграция промышленных роботов в единую информационную среду предприятия на основе трехуровневой архитектуры с применением методов предиктивной аналитики позволяет создать гибкое производство, способное быстро адаптироваться к изменениям рыночного спроса. Дальнейшее развитие данных систем будет неразрывно связано с совершенствованием алгоритмов искусственного интеллекта и расширением функциональных возможностей сенсорного оборудования, что в конечном итоге приведет к появлению полностью автономных производственных комплексов нового поколения. Полученные в ходе исследования результаты могут быть использованы при модернизации существующих производств и проектировании новых предприятий.

Библиографический список

1. Авдони́на А.Е., Коченгина О.Е., Куттуева М.А. Автоматическое Определение количества радиокомпонентов на ленте // Цифровые технологии прикладных научных исследований: материалы международной

научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2025. – С. 163-165.

2. Куттуева М.А., Чураков А.В. Перспективные направления использования микроконтроллеров в области пожарной безопасности // Сборник научных статей по итогам научно-исследовательских работ 2024 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2025. – С. 337-343.

3. Роботизированная автоматизация процессов. URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:RPA_\(Robotic_process_automation,_%D0%A0%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%BE%D0%B2\)](https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:RPA_(Robotic_process_automation,_%D0%A0%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%BE%D0%B2)) (дата обращения 04.03.2026).

4. О цифровой трансформации энергетической отрасли. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-tsifrovoy-transformatsii-energeticheskoy-otrasli/viewer> (дата обращения 06.03.2026).

Сведения об авторах

ФИО	Коченгина Оксана Евгеньевна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	oksana.kuz5@mail.ru
ФИО	Куттуева Мария Александровна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	mkuttueva@yandex.ru
ФИО	Чураков Андрей Владимирович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова

Адрес организации 194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург,
Россия
SPIN-код 9526-9599
e-mail sheff_2.01@mail.ru

Аннотация

В статье рассматриваются современные подходы к автоматизации производственных линий на базе интеграции роботизированных комплексов и интеллектуальных систем мониторинга. Проведен анализ текущего состояния промышленной автоматизации, выявлены ключевые проблемы традиционных методов управления. Особое внимание уделяется архитектуре построения гибких производственных систем (ГПС), включающих промышленные роботы, сенсорные сети и SCADA-системы. Предложена концепция замкнутого цикла управления, основанная на анализе больших данных в реальном времени, что позволяет повысить эффективность оборудования и снизить влияние человеческого фактора.

Ключевые слова: автоматизация, роботизированный комплекс, промышленный робот, мониторинг, управление производством, SCADA, ГПС.

УДК 658.52.011.56

Разделы рубрикатора ГРНТИ 50.43.29

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Сененкова И.И., Теппоев А. В.

Введение.

В последние годы развитие цифровых технологий существенно изменило подходы к управлению производственными процессами. Предприятия всё чаще переходят от традиционных методов контроля к использованию цифровых систем, способных работать с большими объёмами данных и обеспечивать высокую точность анализа.

Одним из таких решений является технология цифровых двойников. Она позволяет не просто фиксировать состояние объекта, но и формировать его цифровую модель, способную «повторять» поведение реальной системы. Это даёт возможность заранее оценивать последствия изменений, выявлять потенциальные проблемы и принимать более эффективные управленческие решения.

Цель работы – анализ технологии цифровых двойников с точки зрения повышения эффективности производственных систем.

Методы исследований.

В работе использован аналитический обзор научно-технической литературы и информации из открытых источников.

Результаты исследований.

Цифровой двойник – это виртуальное представление реального объекта, системы или процесса. Он создаётся на основе данных, поступающих от различных источников, и обновляется в режиме реального времени. В отличие от обычных моделей, цифровой двойник не является статичным – он постоянно изменяется вместе с реальным объектом. Одним из ключевых элементов, обеспечивающих работу цифровых двойников, является интернет вещей. IoT представляет собой сеть устройств, оснащённых датчиками и средствами передачи данных. Эти устройства собирают информацию о состоянии оборудования, окружающей среде и производственных процессах. Полученные данные передаются в цифровую модель, что позволяет поддерживать её актуальность [1].

Использование IoT делает цифровые двойники более точными и функциональными. Например, датчики могут фиксировать температуру, давление, скорость работы оборудования и другие параметры. Это позволяет не только наблюдать за процессами, но и анализировать их в динамике. Создание цифрового двойника включает несколько этапов. Сначала формируется цифровая модель объекта. Затем к ней подключаются источники данных. После этого обеспечивается синхронизация с реальной системой. На заключительном этапе цифровой двойник используется для анализа и оптимизации процессов.

Современные цифровые двойники также тесно связаны с облачными технологиями. Облачные платформы позволяют хранить и обрабатывать большие объёмы данных, а также обеспечивают доступ к информации из различных точек. В сочетании с граничными вычислениями это позволяет значительно ускорить обработку данных и повысить эффективность системы. Концепция соотнесения реального и виртуального пространства представлена на рис. 1.

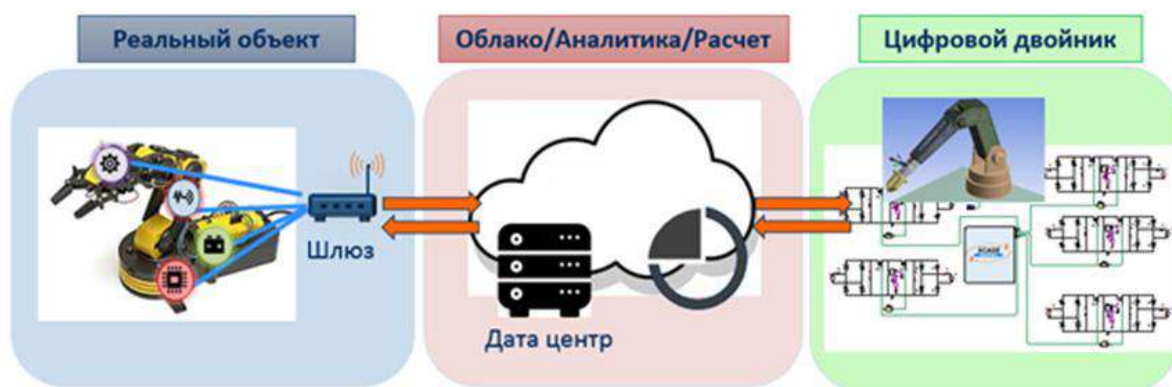


Рис. 1. Концепция соотнесения реального и виртуального пространства

Важным направлением развития технологии является использование искусственного интеллекта. Алгоритмы машинного обучения позволяют выявлять закономерности в данных и прогнозировать возможные изменения. В результате цифровой двойник становится инструментом не только наблюдения, но и прогнозирования (рис. 2).

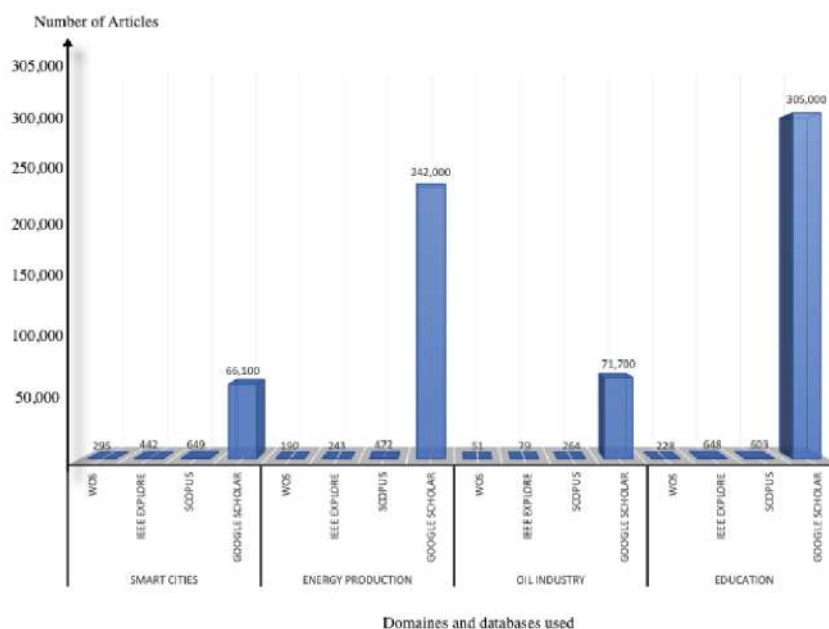


Рис. 2. Цифровой двойник в различных областях

Цифровые двойники активно применяются в промышленности. Например, компания Siemens использует их для моделирования производственных процессов и оптимизации работы оборудования. Это

позволяет тестировать различные сценарии без риска для реального производства.

Компания NVIDIA применяет цифровые двойники для создания виртуальных моделей сложных систем, включая заводы и инфраструктурные объекты. Использование таких моделей позволяет анализировать процессы и улучшать их эффективность [2].

В транспортной отрасли цифровые двойники используются для контроля состояния инфраструктуры. Так, в железнодорожной сфере они помогают отслеживать состояние путей и оборудования, а также планировать ремонтные работы. Это повышает надёжность эксплуатации и снижает затраты [3-6].

В Российской Федерации технология также находит применение. Например, в проектах развития городской среды создаются цифровые модели городов. В Москве реализуется цифровой двойник, объединяющий данные о транспорте, инженерных сетях и инфраструктуре. Это позволяет моделировать различные сценарии развития и повышать эффективность управления [4].

Кроме того, цифровые двойники используются в промышленности для мониторинга оборудования. Они позволяют выявлять отклонения в работе техники и предотвращать возможные сбои. Это особенно важно для сложных производственных систем, где остановка оборудования может привести к значительным потерям.

Выводы.

Таким образом, цифровые двойники находят применение в различных сферах – от промышленности до городской инфраструктуры. Их использование позволяет повысить эффективность работы систем, снизить затраты и улучшить качество управления.

К основным преимуществам технологии можно отнести повышение точности планирования, снижение рисков, улучшение качества продукции и возможность прогнозирования. Кроме того, цифровые двойники позволяют проводить виртуальные эксперименты, что делает процессы более безопасными и управляемыми.

В заключение можно отметить, что цифровые двойники становятся важным элементом современной цифровой экономики. Их развитие связано с интеграцией интернета вещей, искусственного интеллекта и облачных технологий. В дальнейшем ожидается расширение их применения и повышение уровня автоматизации производственных процессов.

Библиографический список

1. Digital Twin: Opportunities and challenges // Applied Sciences. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/13/5454> (дата обращения 08.04.2026).
2. NVIDIA. What is a Digital Twin? URL: <https://www.nvidia.com/en-us/glossary/digital-twin/> (дата обращения 08.04.2026).
3. Digital twins in railway infrastructure URL: <https://www.globalrailwayreview.com/article/122490/digital-twins-maintenance-railway-infrastructure> (дата обращения 08.04.2026).
4. Digital twin of the city. URL: <https://innoter.com/en/articles/urban-planning-digital-twin-of-the-city> (дата обращения 08.04.2026).
5. Microsoft. Azure Digital Twins Overview URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/digital-twins/overview> (дата обращения 08.04.2026).
6. IBM. Digital Twin. URL: <https://www.ibm.com/think/topics/digital-twin> (дата обращения 08.04.2026).

Сведения об авторах

ФИО	Теппоев Алексей Викторович
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	4451-4059
e-mail	avt01@inbox.ru
ФИО	Сененкова Ирина Игоревна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	avt01@inbox.ru

Аннотация

В статье рассматриваются основные принципы функционирования цифровых двойников, особенности их создания и применения в производственной деятельности. В настоящее время эта технология является одним из ключевых направлений цифровой трансформации и находит широкое применение в различных отраслях промышленности.

Ключевые слова: цифровой двойник, моделирование, планирование и управление производством, цифровая трансформация, искусственный интеллект, интернет вещей.

УДК.630*848

ГРНТИ 55.01.81

ОТЕЧЕСТВЕННОЕ МУЛЬЧИРУЮЩЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ: КЛАССИФИКАЦИЯ, ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОГО РЫНКА

Чечиль В.В., Чечиль Е.В, Кацадзе В.А.

Введение.

В условиях санкционного давления и курса на импортозамещение, взятых правительством РФ, вопросы развития отечественного машиностроения приобретают особую актуальность. Одной из ниш, где российские производители начинают заявлять о себе все более уверенно, является производство мульчеров – оборудования для измельчения древесно-кустарниковой растительности.

Долгое время рынок мульчирующей техники в России был представлен преимущественно импортными брендами – итальянскими, немецкими и американскими производителями. Однако, как отмечают эксперты, «в России практически никто пока не делает мульчеры» – эта ситуация начала меняться с середины 2010-х годов.

Актуальность систематизации знаний об отечественных мульчерах обусловлена несколькими факторами: во-первых, ростом числа российских производителей, выходящих на рынок; во-вторых, необходимостью объективной оценки качества и технических характеристик отечественной продукции; в-третьих, потребностью потенциальных покупателей в информации о российских аналогах импортного оборудования.

Цель и задачи исследования.

Цель исследования – систематизация сведений о российских производителях лесных мульчеров, классификация их продукции по техническим и конструктивным признакам, а также выявление особенностей развития отечественного рынка мульчирующего оборудования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Выявить основных российских производителей мульчирующего оборудования на основе анализа открытых источников.
- 2) Изучить технические характеристики выпускаемой продукции.
- 3) Предложить классификацию отечественных мульчеров по типу привода и конструктивному исполнению.
- 4) Определить перспективы и тенденции развития российского рынка мульчеров.

Методы исследования.

В работе использован комплекс методов, включающий: аналитический метод (изучение открытых источников, официальных сайтов производителей, отраслевых публикаций), метод систематизации (группировка оборудования по классификационным признакам) и сравнительный метод (сопоставление технических характеристик различных моделей).

1. Основные российские производители мульчирующего оборудования.

Анализ открытых источников позволяет выделить несколько ключевых предприятий, занимающихся производством мульчеров или самоходной мульчирующей техники в РФ.

1.1. Плавающие болотоходные мульчеры «Тром», производитель ИП Гринкевич А. В. (Сургут).

Особое место среди отечественных производителей занимает «Тром» (Сургут), которая позиционирует свою продукцию как узкоспециализированную технику для эксплуатации в условиях (чрезвычайно) высокого увлажнения и полного бездорожья (рис. 1). Если большинство российских предприятий адаптируют стандартные тракторы или экскаваторы, то «Тром» создает мульчеры на базе собственных плавающих вездеходов-амфибий. Разработка принадлежит конструктору Алексею Гринкевичу, а сам проект реализуется при поддержке Технопарка Югры.



Рис. 1. Плавающий болотоходный мульчер Тром-20УЭС

Ключевая продукция:

- Плавающий мульчер «Тром-20 УЭС» (также известен как «Тром-8»): Самоходная колесная машина на шинах сверхнизкого давления (размер 1650×570 мм, давление от 0,15 атм). Благодаря герметичному тримаранному корпусу способна преодолевать вплавь реки и озера (скорость до 5 км/ч), болота и заболоченную тундру без повреждения верхнего слоя почвы (ягеля), что критично для арктических зон.

- Дисковая мульчерная навеска собственной разработки: в отличие от традиционных молотковых роторов, «Тром» использует тяжелый диск диаметром 1500 мм с твердосплавными зубьями. Частота вращения достигает 1500-1550 об/мин. Утверждается, что дерево диаметром до 250 мм уничтожается за 15-20 секунд, при этом ствол не валится на землю, а измельчается в вертикальном положении, что снижает энергозатраты.

Технические особенности:

Машина оснащается двигателем ЯМЗ-534 мощностью 200 л.с. (крутящий момент 700 Нм). Гидросистема создает давление до 28 МПа (350 атм) с потоком до 250 л/мин. Важной особенностью является роликовый привод колес и автоматическая система подкачки шин из кабины. Производитель заявляет уровень локализации до 98% (включая шины собственного производства).

Уникальность предложения:

В отличие от «Лестехпрома», продукция «Тром» не является навесным орудием для стандартного трактора. Это самоходный земноводный мульчер, не имеющий прямых аналогов в РФ и в мире, созданный специально для обслуживания труднодоступных участков ЛЭП, трубопроводов в Сибири и на Дальнем Востоке, куда другая техника

физически не может добраться вне зимнего периода. Эксплуатация возможна до 10 месяцев в году.

1.2. UM-Forest (ООО «Компания Промышленный Меридиан», Пермь).

Один из наиболее известных производителей навесных мульчеров. Компания начала разработку чертежей в 2014 году, сделав ставку на создание собственной конструкции, а не на копирование западных образцов. К 2018 году предприятие запустило в производство 23 модели мульчеров, различающихся по типу привода, ротора и ширине обработки.

Компания выпускает механические мульчеры (с приводом от ВОМ трактора) и гидравлические (для экскаваторов и погрузчиков). Важной особенностью является собственное производство редукторов.

1.3. Завод «Алтайлесмаш» (Барнаул).

Предприятие, основанное в 2005 году, специализирующееся на производстве гусеничной техники для лесной, нефтегазовой и геологической отраслей. В отличие от UM-Forest, «Алтайлесмаш» фокусируется на создании самоходных машин, адаптированных для суровых климатических условий.

Ключевая продукция:

- Мულчер на базе гусеничной машины ТЛ-5АЛМ: представляет собой гусеничный транспортер, оснащенный мულчерной головкой FAE 200/U-200. Техника имеет операционный вес 13 900 кг и оснащается двигателем Д-3061 мощностью 255 л.с. Удельное давление на грунт составляет всего 0,35 кг/см², что обеспечивает высокую проходимость.

- Мулчер на базе трактора МТК-200: Колесный вариант на базе трактора мощностью 180 л.с., агрегируемый с мулчером FAE UMM/DT-200 шириной захвата 2070 мм. Способен сокрушать деревья диаметром до 300 мм.

- Многофункциональная машина МТЧ-4: Уникальная разработка, сочетающая в себе функции высокопроходимого самосвала и мулчера. Машина получила двигатель ЯМЗ-53602-А51 мощностью 312 л.с., самосвальный кузов объемом 13 м³ и мулчерную голову для расчистки кустарников и мелкоколесья.

1.4. ООО «Лестехпром» (Нижний Новгород).

Компания «Лестехпром» является одним из заметных игроков на рынке отечественного навесного мულчирующего оборудования. Предприятие специализируется на производстве мулчеров для тракторов и экскаваторов, ориентированных на расчистку лесных и сельскохозяйственных угодий.

Конструктивные особенности мулчеров «Лестехпром»:

- Ротор молоткового типа с возможностью установки различных типов режущих элементов.

- Усиленная конструкция корпуса из высокопрочной стали.
- Наличие предохранительной муфты для защиты от перегрузок.
- Регулируемая фракция измельчения.

Предприятие выпускает три серии оборудования: тракторные мульчеры ЛТП-МТ (привод от ВОМ, молотковый ротор), экскаваторные мульчеры ЛТП-МЭ (гидравлический привод) для расчистки канав и обочин, а также ротоваторы ЛТП-Р, предназначенные для заглубления в почву и измельчения пней с корневой системой.

2. Сводная сравнительная таблица отечественных производителей мульчеров (табл. 1).

Табл. 1. Сравнительная таблица отечественных производителей мульчеров

Производитель	Тип выпускаемой продукции	Привод	Особенности	Модельный ряд
«Тром-8» (Сургут)	Самоходные плавающие мульчеры (амфибии)	Гидравлический (самоходный)	Уникальная проходимость (амфибия), шины СНД, дисковая фреза, высокая локализация (98%)	«Тром-20 УЭС» («Тром-8»)
UM-Forest (Пермь)	Навесные мульчеры	Механический (ВОМ), гидравлический	23+ моделей, собственные редукторы	Широкая линейка моделей
Алтайлесмаш (Барнаул)	Самоходные гусеничные, навесные	Гидравлический (самоходные), ВОМ (навесные)	Техника для сурового климата, низкое давление на грунт	ТЛ-5АЛМ, МТК-200, МТЧ-4
Лестехпром (Н.Новгород)	Навесные мульчеры, ротоваторы	Механический (ВОМ), гидравлический	Молотковый ротор, усиленная конструкция	ЛТП-МТ, ЛТП-МЭ, ЛТП-Р

3. Классификация отечественных мульчеров

На основе анализа продукции российских производителей можно предложить следующую классификацию (табл. 2, 3).

Табл. 2. Классификация по типу базовой машины

Тип	Характеристика	Производители
Навесные тракторные	Привод от ВОМ, широкий диапазон рабочих ширин	UM-Forest, Лестехпром, Delta
Навесные гидравлические	Для экскаваторов и погрузчиков, высокая маневренность	UM-Forest, Лестехпром
Самоходные гусеничные	Высокая проходимость, низкое давление на грунт	Алтайлесмаш
Самоходные колесные	Высокая мобильность, шарнирно-сочлененная рама	Тром-8

Табл. 3. Классификация по назначению и конструкции рабочего органа

Тип	Назначение	Производители
Мульчеры для поверхностного измельчения	Срезание и измельчение надземной растительности	UM-Forest, Лестехпром, Delta, Тром-8
Ротаторы (для корней)	Уничтожение корневой системы, заглубление в почву	Лестехпром (ЛТП-Р)
Многофункциональные машины	Мульчирование + транспортировка + уборка снега	Алтайлесмаш (МТЧ-4), Тром-8

4. Перспективы развития российского мульчеростроения.

Анализ источников позволяет выделить несколько факторов, определяющих перспективы развития отечественного производства мульчеров.

4.1. Государственная поддержка.

Программы субсидирования, в частности в рамках развития мелиоративного комплекса России, создают дополнительный спрос на мульчирующую технику.

4.2. Расширение сфер применения.

Как отмечает представитель UM-Forest, «рынок заказчиков расширяется. Уже сейчас мульчерами начинают интересоваться дорожники, которые используют их для содержания обочин... Также аграрные предприятия интересуются».

4.3. Импортозамещение.

Санкционное давление и уход части западных производителей с российского рынка создают окно возможностей для отечественных предприятий.

5.4. Проблемы и ограничения.

Основными проблемами остаются зависимость от импортных комплектующих (подшипники, ремни, гидравлика) и относительно небольшой накопленный опыт эксплуатации по сравнению с западными производителями.

Заключение.

На территории Российской Федерации сформировался устойчивый и диверсифицированный сегмент производителей мульчирующей техники. Основными игроками являются UM-Forest (Пермь), специализирующийся на навесных мульчерах (23+ модели); Алтайлесмаш (Барнаул), выпускающий самоходные гусеничные машины для суровых условий; а также Лестехпром (Нижний Новгород).

Особого внимания заслуживает относительно новое, но технологически значимое направление, представленное компанией «Тром-8» (Сургут). В отличие от большинства отечественных предприятий, данная компания реализовала концепцию самоходного плавающего мульчера-амфибии на шинах сверхнизкого давления (Тром-20 УЭС). Данное решение не имеет прямых аналогов в сегменте российской навесной техники и предназначено для эксплуатации в условиях обводненной местности, заболоченной тундры и арктических территорий, где применение классических гусеничных или колесных машин (в том числе продукции Алтайлесмаша) затруднено или сезонно ограничено.

Классификация отечественных мульчеров может быть построена по нескольким признакам: по типу базовой машины (навесные тракторные, навесные гидравлические, самоходные гусеничные, самоходные колесные, самоходные плавающие-амфибии), по типу привода (механический от ВОМ, гидравлический), по назначению (поверхностное измельчение, ротораторы для корней, многофункциональные машины, техника для сверхвысокой проходимости).

Основными проблемами отрасли остаются зависимость от импортных комплектующих (подшипники, ремни, гидравлика) и относительно небольшой накопленный опыт эксплуатации по сравнению с западными производителями. Однако, как показывает пример «Тром-8», демонстрирующий локализацию до 98% (включая шины), отдельные

нишевые игроки успешно преодолевают эту зависимость, создавая уникальные продукты с высокой добавленной стоимостью.

Перспективы развития отечественного мульчеростроения оцениваются как положительные благодаря государственной поддержке, расширению сфер применения (включая труднодоступные территории ТЭК и Арктику) и общему курсу на импортозамещение. При этом отчетливо прослеживаются две стратегии развития: экстенсивная (расширение линейки навесных орудий под стандартные тракторы, как у UM-Forest) и интенсивная (создание узкоспециализированных сверхпроходимых машин-амфибий, как у «Тром-8»).

Список использованных источников

1. UM-Forest: «Мульчеры – это оборудование, которое надо сразу широкой линейкой выпускать» [Электронный ресурс] // Журнал о мульчерах TopMulcher, 2018. URL: <https://topmulcher.ru/aleksandr-vinokurov-um-forest-mulchery-eto-oborudovanie-kotoroe-nado-srazu-shirokoj-linejkoj-vypuskat/> (дата обращения: 31.03.2026).

2. Завод «Алтайлесмаш» - производство и продажа мульчерной техники в России. URL: <https://altailesmash.ru/> (дата обращения: 31.03.2026).

3. ООО «ЛЕСТЕХПРОМ»] // РБК Компании. URL: <https://companies.rbc.ru/id/1197847112968-obschestvo-s-ogranichennoj-otvetstvennostyu-lestehprom/> (дата обращения: 31.03.2026).

4. Мульчер ТРОМ 20 УЭС: плавающий вездеход. URL: <https://trom20.ru/Мульчер> (дата обращения: 31.03.2026).

Сведения об авторах

ФИО	Чечиль Владислав Васильевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	simochko2003@yandex.ru

ФИО	Чечиль Евгения Васильевна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	evgeniachechil@gmail.com

ФИО	Кацадзе Владимир Аркадьевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	3205-0333
e-mail	tlzp@mail.ru

Аннотация

В статье представлены результаты систематизации сведений о российских производителях лесных мульчеров. На основе анализа открытых источников выявлены основные предприятия, выпускающие мульчирующее оборудование на территории РФ: UM-Forest (Пермь) — лидер по навесным мульчерам (23+ моделей); Алтайлесмаш (Барнаул) — специализируется на самоходных гусеничных машинах (ТЛ-5АЛМ, МТЧ-4); Лестехпром (Нижний Новгород) — выпускает навесные мульчеры серий ЛТП-МТ, ЛТП-МЭ, ЛТП-Р; а также производители мульчеров Delta. Разработана классификация отечественной продукции по типу базовой машины, типу привода и назначению. Проведен сравнительный анализ технических характеристик. Определены основные тенденции развития российского рынка мульчеров: рост числа производителей, расширение сфер применения, участие в государственных программах субсидирования, а также сохраняющаяся зависимость от импортных комплектующих.

Ключевые слова: лесной мульчер, российский производитель, UM-Forest, Алтайлесмаш, Лестехпром, Delta RSL, импортозамещение, классификация мульчеров, навесное оборудование, самоходный мульчер, роторатор, шарнирно-сочлененное шасси.

УДК: 630.36:631.311.7

Разделы рубрикатора ГРНТИ: 68.03.03; 68.85.85

ЛЕСОПИЛЬНЫЙ СТАНОК «МАСТЕР 2000-05»: ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Чечиль В.В., Чечиль Е.В., Козлова И.К.

Введение.

Лесопильный станок «Мастер 2000-05» представляет собой современное Российское деревообрабатывающее оборудование, предназначенное для продольной распиловки бревен на пиломатериалы.

Это компактное и экономичное решение для оснащения малых и средних лесопильных предприятий, ориентированное на условия небольшого производства с ограниченными площадями и энергетическими мощностями.

Цель и задачи исследования – провести детальный технический анализ лесопильного станка «Мастер 2000-05», оценить его конструктивные особенности и определить эффективность использования.

Задачи:

- Описать технические характеристики и конструкцию станка.
- Проанализировать кинематическую схему и точностные параметры.
- Рассчитать производительность.
- Сравнить с аналогами зарубежного производства.
- Выявить достоинства, недостатки и дать рекомендации по эксплуатации.

Методы исследования.

- Аналитический – изучение техдокументации и ГОСТов.
- Сравнительный – сравнение с другими лесопильными станками.
- Расчетный – вычисление производительности по формуле.
- Табличный – оформление данных в таблицы.
- Экспертный – оценка режимов работы и типовых неисправностей.

Результаты исследования.

1. Общие сведения и назначение.

Лесопильный станок "Мастер 2000-05" предназначен для распиловки бревен хвойных и лиственных пород дерева на необрезные и обрезные пиломатериалы. Оборудование может использоваться как самостоятельно, так и в составе лесопильных линий малой и средней мощности.

Основные области применения:

- малые и средние лесопильные предприятия;
- крестьянские и фермерские хозяйства;

- строительные организации, имеющие собственное деревообрабатывающее производство;
- ремонтно-механические мастерские.

2. Технические характеристики (табл. 1).

Табл. 1. Технические характеристики лесопильного станка
«Мастер 2000-05»

Диаметр обрабатываемого бревна, мм	140 - 900
Длина обрабатываемого бревна, м	1,2 - 7,5 (+3,0 ...)
Диаметр пильных шкивов, мм	850
Ленточная пила (базовый вариант), мм	54x1,07x6710
Скорость протяжки ленточной пилы, м/сек	40
Толщина пропила, мм	1,6 – 2,2
Скорость подачи портала, м/мин	0 - 45
Производительность (обрезная доска 50 мм), м ³ /час	1,2 - 1,5
Напряжение питания, В	380
Мощность двигателя привода пилы, кВт	18,5
Габариты станка, м	9,0x3,2x2,15
Площадь, занимаемая станком, м ² (м)	27,0 (9,0 x 3,0)
Вес, кг	3600

3. Конструктивные особенности.

Пильный агрегат расположен под углом 10° по отношению к оси бревна, что позволяет значительно увеличить скорость и качество пиления и уменьшить нагрузку на ленточную пилу и двигатель, в результате чего:

- зубья ленточной пилы заходят в бревно не одновременно, а последовательно, поэтому не происходит ударной нагрузки на пилу, что значительно продлевает срок ее службы и исключает «волну» даже в начале запила;
- усилие при распиловке уменьшается;
- скорость пиления значительно увеличивается;
- более рационально используется мощность двигателя;
- большее количество зубьев участвует в распиле;

- зубья пилы входят в бревно всей режущей кромкой, поэтому улучшается и качество поверхности пиломатериала (проявляется эффект частичного строгания поверхности).

Широкий диапазон размеров используемых ленточных пил: по ширине: 38-60 мм, по толщине: 0,6-1,2 мм.

Низкий уровень шума, возможность установки пилорамы в закрытом помещении, низкий уровень вибрации, большой моторесурс, отсутствие необходимости в профилактических работах, например, замене масла и т.п., возможность эксплуатации в режиме 2...3-х сменной работы.

Преимущества.

Основное отличие станка «Мастер 2000-05» от других пильных инструментов подобного класса заключается в том, что она имеет более жесткую раму, что сказывается на надежности, стабильности в работе и высоком уровне ремонтпригодности. Именно из этих соображений все мелкие комплектующие (цепи, звездочки, подшипники, ремни и т.д.) выбраны из ассортимента автозапчастей.

Гидравлический кантователь способен за короткое время осуществить на станине. Применение этого устройства приводит к повышению производительности и устранению ручного труда персонала. Это особенно актуально при распиловке крупномерного пиловочника.

Гидравлические зажимы имеют возможность фиксации заготовки для стабилизации внутренних напряжений бревна, что делает дальнейшую распиловку качественной и не имеющей погрешности.

На операциях, где используются более сложные варианты конструкции (электроника, гидравлика, автоматика) в любой момент можно перейти на ручное управление.

Одним из определяющих факторов при выборе ленточнопильного станка является жесткая, надежная и устойчивая каретка с пильным станком.

При распиловки загрязненной древесины, есть возможность установки окорочной фрезы, которая движется перед ленточной пилой и снимает кору в месте распила.

Для загрузки бревна с земли на станину предусмотрен мощный гидравлический погрузчик бревна, позволяющий поднимать бревна диаметром до 900 мм, весом до 4 тонн. Габариты устройства загрузки, мм: 3000 (ш) x 600 (в) x 1500 (д). На рис. 1 представлен внешний вид станка.



Рис. 1. Внешний вид «Мастер 2000-05»

4. Производительность и эффективность.

Исходные данные (характеристики станка «Мастер 2000-05»):

- Наибольший диаметр бревна: 500 мм.
- Установленная мощность: ~18 кВт.
- Скорость резания (ленты): обычно 30–35 м/с (зависит от шкивов и частоты вращения).

Принимаем для расчета:

- Порода древесины: Хвойные породы дерева, например, сосна (наиболее распространена).
- Влажность: 90% (естественной влажности).
- Средний диаметр бревна: 300 мм (в вершине).
- Длина бревна (L): 6 м.
- Толщина пильного полотна (b): 1,2 мм (с разводом ~2,2 мм).
- Скорость резания (V_p): 12,6 м/с.
- Коэффициент использования ($K_{и}$): 0,93.
- Эффективность работы (сменность): 1 смена (8 часов) для суточной, 250 рабочих дней для годовой.

Расчет скорости подачи и резания.

Для расчета производительности нам нужно определить оптимальную скорость подачи ($U_{опт}$), при которой пила не тупится и не происходит вибраций. Используем формулу из справочной литературы [3]:

$$U_{опт} = \frac{V_p * h}{H * t}. \quad (1)$$

Принимаем:

- Высота пропила (H) = Диаметр бревна = 300 мм = 0,3 м.
- Шаг зубьев пилы (t) = 22 мм (для мягкой древесины).

- Подача на зуб (S_z) для сосны рекомендуется 0,3–0,5 мм. Берем $S_z = 0,4$ мм.

Количество зубьев, одновременно находящихся в пропиле:

$$Z = \frac{H}{t} = \frac{300}{22} \approx 14 \text{ зубьев.} \quad (2)$$

Скорость подачи (м/мин):

$$U = \frac{S_z * Z * n}{1000}, \quad (3)$$

где n – частота вращения пилы (об/мин). Свяжем через скорость резания V_p .

Находим частоту вращения пильного шкива (n). Длина окружности шкива (пилы) = $\pi * D_{\text{шкива}}$. Диаметр шкива станка Мастер 2000-05 обычно 560 мм.

- Длина окружности: $C = 3.14 * 0,56 = 1.76$ м.

- Скорость резания $V_p = 12,6$ м/с = 756 м/мин.

- Обороты пилы: $n = \frac{V_p}{C} = \frac{756}{1,76} \approx 430$ об/мин.

Рассчитываем подачу на зуб (S_z) теоретически через мощность (проверочный метод):

Для мощности 18 кВт при распиловке сосны диаметром 300 мм допустимая скорость подачи по паспортным данным аналогичных станков составляет до 6 м/мин на черновой распиловке с учетом припускам 0,15 м.

Затраты времени на вспомогательные операции (T_v).

Вспомогательное время складывается из:

- Загрузка бревна (накатывание на приемные рычаги, центрирование, зажим): 0,8 мин.

- Холостой ход каретки (возврат пильной каретки в исходное положение): 0,3 мин.

- Управление (включение подачи, подъем/опускание пильного узла): 0,2 мин.

- Сброс горбыля/доски и отвод: 0,5 мин.

- Перемещение бревна на следующий пропил: совмещено с холостым ходом, но добавим на корректировку 0,2 мин.

Суммарное вспомогательное время на один рез (T_v):

$$0,8 + 0,3 + 0,2 + 0,5 + 0,2 = 2,0 \text{ мин.}$$

Расчет производительности (цикловая).

Время цикла ($T_{\text{ц}}$) на один рез:

$$T_{\text{ц}} = T_o + T_v, \quad (4)$$

где T_o – основное время пиления (машинное время).

- Длина бревна (L) = 6 м.

- Скорость подачи (U) = 6 м/мин.

- $T_o = L / U = 6 / 6 = 1$ мин.

$T_{\text{ц}} = 1 \text{ мин} + 2,0 \text{ мин} = 3 \text{ мин}$ на один рез (распил бревна на две части: брус + горбыль или доска + горбыль).

Важное уточнение: чтобы распилить бревно диаметром 300 мм на обрезные доски, потребуется примерно 8-10 резов (в зависимости от постава). Для упрощения расчета годовой производительности мы должны считать не резы, а объем готовой продукции в час.

Лучше рассчитать производительность в кубометрах готового пиломатериала (за вычетом опилок и горбыля).

Расчет производительности в м³/час.

1) Объем одного бревна ($V_{\text{бр}}$):

$$V = \pi * R^2 * L. \quad (5)$$

$R = 0,15 \text{ м}, L = 6 \text{ м}.$

$$V = 3,14 * 0,15^2 * 6 = 0,424 \text{ м}^3 \text{ (плотная мера).}$$

2) Объемный выход пиломатериалов (коэффициент выхода): для сосны при распиловке бревна $d=300 \text{ мм}$ на ленточнопильном станке выход обрезных пиломатериалов составляет в среднем 62% (остальное – опилки, горбыль, усушка):

$$V_{\text{пил}} = 0,424 * 0,62 = 0,263 \text{ м}^3 \text{ - готовой продукции с одного бревна.}$$

3) Время на разделку одного бревна (на доски): если на бревно требуется в среднем 6 резов (с учетом кантовки бруса), то общее время на бревно:

$$T_{\text{бр}} = (T_o + T_v) * 6 = 3 * 6 = 18 \text{ минута} = 0,3 \text{ часа.}$$

4) Часовая производительность ($\Pi_{\text{ч}}$):

$$\Pi_{\text{ч}} = \frac{V_{\text{пил}}}{T_{\text{бр}}} = \frac{0,263}{0,3} \approx 0,88 \text{ м}^3/\text{час} \text{ (чистого пиломатериала).}$$

5) Суточная производительность:

Смена — 8 часов. Коэффициент использования станка ($K_{\text{и}}$) = 0,93, учитывает смену пилы, перерывы оператора, мелкий ремонт).

$$\Pi_{\text{сут}} = \Pi_{\text{ч}} * 8 * K_{\text{и}}$$

$$\Pi_{\text{сут}} = 0,88 * 8 * 0,93 = 6,55 \text{ м}^3/\text{сутки.}$$

Итого в смену (8 часов): примерно 6,5 куб. метров готовых досок.

6) Годовая производительность:

При односменной работе и 250 рабочих днях в году (без учета праздников и плановых ремонтов, которые уже учтены в $K_{\text{и}}=0,93$):

$$\Pi_{\text{год}} = \Pi_{\text{сут}} * 250$$

$$\Pi_{\text{год}} = 6,55 * 250 = 1637 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Годовая производительность станка МАСТЕР 2000-05 при распиловке бревен $d=300 \text{ мм}$ (сосна): примерно 1600 м³ пиломатериалов.

Сравнение расчетных характеристик, с характеристиками заявленными производителем Мастер «2000-05» (табл. 2).

Табл. 2. Сравнение производительности с зарубежным аналогом

Вид	Производительность, м³/час	Производительность, м³/смену	Производительность, м³/год
Расчетная	0,88	6,5	1600
Теоретическая	1,2	9,6	2400

Стоит учесть, что данные, заданные производителем, предполагают производительность на максимальном диаметре бревна в 500 мм.

Заключение.

Проведенный анализ лесопильного станка «Мастер 2000-05» показал, что данное оборудование представляет собой надежное и ремонтпригодное решение для малого бизнеса. Благодаря жесткой раме, наклонному пильному узлу и гидравлическим механизмам станок обеспечивает стабильное качество распила при работе с крупномерным сырьем. Расчетная производительность при распиловке сосны диаметром 300 мм составляет 0,88 м³/час, что позволяет перерабатывать до 1637 м³ пиломатериалов в год при односменном режиме. Сравнение с характеристиками, заявленными производителем, показывает разницу между реальными объемами и теоретическими объемами, которые обещает производитель. Мастер 2000-05 является оправданным выбором для условий ограниченных площадей и энергомощностей, обеспечивая низкую стоимость владения и простоту обслуживания, хороший процент выхода продукции.

Список использованных источников

1. Януш С.Ю., Угрюмов С.А., Медведков О.И. Сравнительный анализ производительности ленточных пилорам Wood-Mizer LT70 и Мастер 2000-05 // Актуальные проблемы развития лесного комплекса, 2025. – С. 224-227.
2. Угрюмов С.А. Продольный раскрой лесоматериалов: учебное пособие. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2023. – 92 с.
3. Проскофьев Г.Ф. Интенсификация пиления древесины рамными и ленточными пилами. – Москва: Лесн. пром-сть, 1990. – 240 с.
4. Соловьев А.А., Коротков В.И. Наладка деревообрабатывающего оборудования: учебник. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высш. шк., 1977. – 320 с.
5. Ленточная пилорама МАСТЕР 2000-05. URL: <https://www.stankomashtorg.ru/products/170/12578/?ysclid=mhzby8j8g236>.

Сведения об авторах

ФИО	Чечиль Владислав Васильевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	simochko2003@yandex.ru

ФИО	Чечиль Евгения Васильевна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	evgeniachechil@gmail.com

ФИО	Козлова Ирина Константиновна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	4547 - 5711
e-mail	kozlova.ik@mail.ru

Аннотация

В статье представлен подробный технический анализ лесопильной рамы "Мастер 2000-05" – отечественного оборудования для продольной распиловки древесины. Рассмотрены конструктивные особенности, технические характеристики, нормы точности и эксплуатационные возможности станка. Приведены сравнительные данные расчетных характеристик, рекомендации по настройке и обслуживанию, а также анализ достоинств и недостатков оборудования.

Ключевые слова: лесопильная рама, Мастер 2000-05, пильная рамка, постав пил, возвратно-поступательное движение, точность распила, производительность.

УДК: 674.053

Разделы рубрикатора ГРНТИ: 55.29.35

ЭВОЛЮЦИЯ ЛЕСОПИЛЬНЫХ РАМ ДЛЯ РАСПИЛОВКИ ДРЕВЕСИНЫ: ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ЗА 100 ЛЕТ

Чечиль В.В., Чечиль Е.В, Козлова И.К.

Введение.

Лесопильная рама – это деревообрабатывающий станок для продольной распиловки бревен и брусьев, в котором режущий инструмент (комплект рамных пил) закреплен в пильной рамке, совершающей возвратно-поступательное движение под действием кривошипно-шатунного механизма. На протяжении столетий этот тип оборудования оставался основой лесопильного производства, обеспечивая до 80% всего объема распиловки древесины в мире.

Первые упоминания о механизированной распиловке бревен в России относятся к концу XVII века, когда использовались пильные мельницы с водяным и ветряным приводом. Лесопильные рамы, приводимые в движение паровой машиной, были построены в 20-х годах XIX века. За 100 лет эволюции этот класс оборудования претерпел кардинальные изменения: от громоздких двухэтажных конструкций массой в десятки тонн до компактных автоматизированных комплексов с компьютерным управлением.

Цель и задачи исследования – систематизация знаний об эволюции лесопильных рам за последние 100 лет и количественная оценка изменений их ключевых параметров.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- реконструировать технологическую картину лесопиления начала XX века и выделить характерные типы лесопильных рам того периода;
- проанализировать советские и современные российские лесопильные рамы.

Методы исследования.

Теоретической базой исследования послужил анализ технической литературы, государственных стандартов (ГОСТ 10294-90, ГОСТ 10295-90), а также изучение технических паспортов оборудования. Основным методом является сравнительно-сопоставительный анализ с элементами технико-экономической оценки. Для наглядности использован метод табличной визуализации данных с приведением всех параметров в единую систему измерений (метрическую).

Результаты исследования.

1. Классификация и общее устройство лесопильных рам.

Лесопильные рамы классифицируются по нескольким признакам:

По конструкции:

Вертикальные (наиболее распространенные) — пильная рамка перемещается вертикально

Горизонтальные — пильная рамка перемещается горизонтально (DIN 8810)

По этажности:

Одноэтажные — все механизмы расположены на одном уровне (ГОСТ 10295-90)

Двухэтажные — кривошипно-шатунный механизм расположен на нижнем этаже, пильная рамка — на верхнем (ГОСТ 10294-90)

По характеру движения пильной рамки:

- С прямолинейной траекторией движения
- С замкнутой криволинейной траекторией

По мобильности:

- Стационарные
- Передвижные

Основными узлами лесопильной рамы являются: пильная рамка с комплектом пил (поставом), кривошипно-шатунный механизм, подающие вальцы, направляющие устройства, приемные и подающие роульганги.

2. Лесопильные рамы начала XX века.

В начале XX века основным типом оборудования были паровые лесопильные рамы с вертикальным расположением пил. Характерной особенностью являлось использование двухэтажной компоновки: на нижнем этаже размещался паровой двигатель и кривошипно-шатунный механизм, на верхнем — пильная рамка.

В 20-х годах XIX века в России были построены первые лесопильные рамы с паровым приводом (рис. 1), которые стали основой промышленного

лесопиления. К началу XX века такие рамы уже широко применялись на лесозаводах Европы и Америки.

В 1923-1924 годах вышло фундаментальное издание Н.А. Песоцкого «Лесопильное дело со всеми вспомогательными к нему производствами», где подробно описывались современные для того периода машины и аппараты для распиловки леса, а также приводились сведения о лучшем устройстве лесопильных заводов в Европе и Америке.

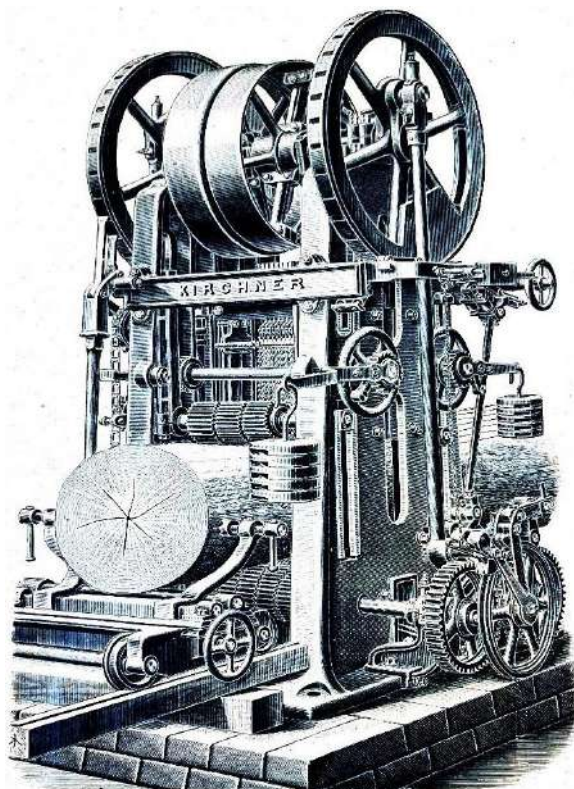


Рис. 1. Паровая лесопильная рама начала XX века

3. Советские лесопильные рамы (середина XX века).

К середине XX века в СССР сложилась собственная школа лесопильного машиностроения. Лесопильные рамы выпускались серийно и поставлялись на экспорт. Государственными стандартами регламентировались основные параметры и нормы точности.

Р-63 – одна из наиболее распространенных моделей советских лесопильных рам (рис. 2). Станок предназначен для распиловки бревен диаметром до 550 мм и длиной до 7500 мм. Конструктивно это двухэтажная рама с вертикальным расположением пил.

Советская рама Р-63, является точной копией паровой европейской, советские технологи взяли раму начала XX века за основу и усовершенствовали ее под свои цели и потребности, основное и

единственное отличие от европейской паровой версии, это то что, советская стала электрической, благодаря чему увеличилась производительность, конструкция осталась прежней.



Рис. 2. Лесопильная рама Р-63

Нормы точности для лесопильных рам регламентировались ГОСТ 10294-90 и ГОСТ 10295-90. Согласно этим стандартам, допуски на установку оборудования составляли:

- 1) Горизонтальность осей подающих вальцов: 0,2-0,3 мм на длине 1000 мм.
- 2) Вертикальность перемещения пильной рамки: 0,35 мм на длине 1000 мм
- 3) Плоскостность по пласти образца: 2 мм на длине 1000 мм.
- 4) Прямолинейность по кромке: 2 мм на длине 1000 мм.
- 5) Перпендикулярность поверхности пропила: ± 2 мм на длине 100 мм.
- 6) Предельные отклонения по толщине для пиломатериалов до 32 мм: $\pm 1,0$ мм

4. Современные российские разработки: лесопильная рама РК-2А.

Настоящим прорывом в отечественном лесопильном машиностроении стала разработка лесопильной рамы РК-2А, в которой реализована принципиально новая кинематическая схема (рис. 3). В отличие от традиционных рам, где пильная рамка совершает строго прямолинейное возвратно-поступательное движение по направляющим, у РК-2А пильная рамка подвешена на рычагах и движется по траектории, имеющей форму вытянутого эллипса. Это конструктивное решение запатентовано и не имеет прямых аналогов в мировой практике.

Привод вращения шести подающих вальцов (четырех нижних и двух верхних) выполнен гидравлическим, как и привод прижима верхних вальцов. Вид подачи — непрерывный, с бесступенчатым регулированием скорости в широком диапазоне. Это позволяет оператору оптимально

настраивать режим резания в зависимости от породы древесины, ее влажности, диаметра бревна и состояния пил. Гидравлическая система работает от отдельного электродвигателя и обеспечивает плавное, без рывков, продвижение бревна через зону резания.



Рис. 3. Лесопильная рама РК-2А

Конструктивные особенности РК-2А:

- Пильная рамка установлена на шарнирной подвеске.
- Все движущиеся части установлены на подшипниках качения, применение пар скольжения полностью исключено.
- При холостом ходе пилы вверх задние грани зубьев не контактируют с дном пропила.
- Процесс распиловки идет более плавно, износ инструмента, нагрузка на станину и вибрация значительно уменьшаются.
- Привод вращения шести подающих валцов (четырех нижних и двух верхних) – гидравлический.
- Привод прижима верхних валцов – гидравлический.
- Вид подачи – непрерывная, с бесступенчатым регулированием.
- Рама может устанавливаться на фундаменты лесопильных рам Р63-4Б Даниловского станкозавода через переходную плиту, что облегчает модернизацию производств.

5. Сравнительный анализ характеристик оборудования разных эпох.

Для количественной оценки эволюции оборудования были выбраны характерные образцы, соответствующие различным технологическим этапам. Все параметры приведены в единую систему метрическую измерений (табл. 1, 2).

Табл. 1. Сравнение характеристик лесопильных рам различных периодов

Параметр	Паровая рама (нач. XX в.)	Р-63 (СССР, сер. XX в.)	РК-2А (РФ, XI в.)
Ширина просвета, мм	500-600	630	630
Ход пильной рамки, мм	500-600	600	300
Число двойных ходов в мин	180-220	320	300
Мощность привода, кВт	37-60	55	26,5
Наибольший диаметр бревна, мм	400-500	550	570
Число пил в поставе, шт	8-12	до 14	3-10
Производительность, м ³ /смен	2-4	8-10	10-12
Точность распила, мм	±2-3	±1,0	±0,8
Масса, кг	15000-20000	18500	4945

Табл. 2. Сравнение кинематических и конструктивных особенностей

Параметр	Паровая рама (нач. XX в.)	Р-63 (СССР)	РК-2А (РФ)
Траектория движения рамки	Прямолинейная	Прямолинейная	Эллиптическая
Тип направляющих	Ползуны скольжения	Ползуны скольжения	Подшипники качения
Привод подачи	Ручной	Механический	Гидравлический
Регулирование подачи	Ступенчатое	Ступенчатое	Бесступенчатое
Привод прижима валяцов	Механический	Механический	Гидравлический
Мобильность	Стационарная	Стационарная	Стационарная

Анализ таблицы демонстрирует кардинальные изменения:

1. Энергоэффективность: Мощность привода снизилась с 55-60 кВт у тяжелых советских рам до 26,5 кВт у современных моделей при сохранении и даже повышении производительности. Это свидетельствует о повышении КПД механизмов и оптимизации кинематических схем.
2. Массогабаритные показатели: Масса оборудования снизилась в 3-4 раза (с 18-20 тонн до 4,9-6,8 тонны). Удельная материалоемкость (масса на

единицу производительности) уменьшилась с 2000-2500 до 600-800 кг/(м³/час).

3. Кинематика: Переход от прямолинейного движения к эллиптической траектории позволил исключить контакт задних граней зубьев с дном пропила на холостом ходу, что снижает вибрацию и износ инструмента.

4. Приводы: Замена механических приводов на гидравлические обеспечила бесступенчатое регулирование подачи и автоматизацию процессов прижима.

5. Подшипниковые узлы: Исключение пар скольжения (текстолитовых ползунов) и переход на подшипники качения повысили культуру производства и снизили эксплуатационные затраты.

Заключение.

Проведенный сравнительный анализ показывает, что за 100 лет лесопильные рамы прошли путь от массивных паровых конструкций до компактного оборудования с гидравлическим приводом и оптимизированной кинематикой.

Если в середине XX века производительность увеличивалась за счет наращивания мощности и размеров оборудования (лесопильные рамы массой до 18-20 тонн), то в XXI веке прогресс обеспечивается за счет оптимизации конструкций, применения новых кинематических схем и гидравлических приводов.

Особенно показательно развитие отечественного лесопильного машиностроения: от тяжелых Р-63 (18,5 т) до современных РК-2А (4,9 т) при сохранении производительности на уровне 8-10 м³/смен. Принципиально новая система движения пильной рамки (эллиптическая траектория) позволяет снизить вибрацию, износ инструмента и нагрузку на станину.

Дальнейшее развитие лесопильных рам будет, вероятно, связано с полной автоматизацией процессов, дальнейшим снижением вибраций и повышением точности обработки, а также интеграцией станков в автоматизированные производственные линии.

Список использованных источников

1. Угрюмов С.А. Продольный раскрой лесоматериалов: учебное пособие. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2023. – 92 с.
2. Лесопильная рама // Первая БСЭ. Том 21. – 1931. – С. 241

3. Рама лесопильная РК-2А (26,5 кВт) // Техническая документация, 2025.

4. ГОСТ 10294-90 (СТ СЭВ 4998-85, СТ СЭВ 6687-89). Государственный стандарт Союза ССР. Деревообрабатывающее оборудование. Рамы лесопильные вертикальные двухэтажные. Основные параметры. Нормы точности. – Москва: Издательство стандартов, 1990. – 9 с.

Сведения об авторах

ФИО	Чечиль Владислав Васильевич
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	simochko2003@yandex.ru

ФИО	Чечиль Евгения Васильевна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	-
e-mail	evgeniachechil@gmail.com

ФИО	Козлова Ирина Константиновна
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	4547 - 5711
e-mail	kozlova.ik@mail.ru

Аннотация

В статье представлен ретроспективный и сравнительный анализ развития лесопильных рам как класса деревообрабатывающего оборудования на протяжении XX–XXI веков. Рассмотрена трансформация технологий: от первых паровых лесопильных рам до современных автоматизированных конструкций с гидравлическим приводом и эллиптической траекторией движения пильной рамки. На основе анализа технических характеристик (производительность, мощность, точность обработки, массогабаритные показатели) выявлены основные закономерности технологического прогресса в лесопилении.

Ключевые слова: лесопильная рама, пильная рамка, возвратно-поступательное движение, Р-63, Wood-Mizer, Мастер 2005, производительность, точность реза, эволюция оборудования.

УДК: 674.053

Разделы рубрикатора ГРНТИ: 55.29.35

Научное издание

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО ИТОГАМ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ 2025 года

9 – 20 февраля 2026 г.

Материалы научно-технической конференции